الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
المعهد العالي للدراسات والبحوث الزلزالية
قسم الهندسة الإنشائية الزلزالية

تقييم الحالة الراهنة للجسور الحجرية بهدف إعادة تأهيلها لمقاومة الأحمال الديناميكية (المتحركة والزلزالية)

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في الهندسة الإنشائية الزلزالية

إعداد

المهندسة سالا صوفيا بشور

إشـــــــراف

الأستاذ الدكتور ساطع بدوي–مشرف رئيسي
كلية الهندسة المدنية–جامعة دمشق

الأستاذ الدكتور ابراهيم عطية–مشرف مشارك
كلية الهندسة المدنية–جامعة دمشق

2015

تقييم الحالة الراهنة للجسور الحجرية بهدف إعادة تأهيلها لمقاومة الأحمال الديناميكية (المتحركة والزلزالية)

Evaluated the Current Situation of the Masonry Bridges in order to Rehabilitate them to Resist Dynamic Loads (Moving And Seismic)

إعداد

م.سالا صوفيا بشور

إشراف

د.م.ساطع بدوي–مشرف رئيسي **د.م.ابراهيم عطية–مشرف مشارك**

أعدت هذه الدراسة لنيل شهادة الماجستير في الهندسة الإنشائية الزلزالية واستحقت بتاريخ 2015/09/30 بحضور لجنة الحكم المؤلفة من السادة:

الدكتور ساطع بدوي **جامعة دمشق**	**الأستاذ في قسم هندسة النقل والمواصلات** **الاختصاص: الجسور البيتونية مسبقة الإجهاد**	**كلية الهندسة المدنية** **عضواً مشرفاً**
الدكتورة ميادة الأحمد الكوسا **جامعة دمشق**	**الأستاذ المساعد في قسم الهندسة الإنشائية** **الاختصاص: أبنية عالية مقاومة للزلازل**	**كلية الهندسة المدنية** **عضواً**
الدكتور أمجد الحلواني **جامعة دمشق**	**المدرس في قسم الهندسة الهندسة الإنشائية** **الاختصاص: رفع كفاءة المنشآت**	**المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية** **عضواً**

كلمةُ شُـــكر

أتقدَّم بالشُّكر للموظفين والعاملين والأساتذة المدرِّسين في المعهد العالي للدِّراسات والبحوث الزِّلزالية على تعاونهم الدَّائم والمتواصل الذي حقَّق لي إتمام هذه الدِّراسة بأفضل حال ... د.هالة حسن، د.ربيع الصَّفدي، د.مهنَّد عفَّاش

وللأساتذة أعضاء لجنة الحُكم على إغناء البحث بملاحظاتهم القيِّمة ... د.ميَّادة الأحمد الكوسا، د.أمجد الحلواني

كما أتقدَّم بالشُّكر للدكتور وائل درويش لتقديمه المساعدة بتأمين نسخة من البرنامج وتعاونه خلال الدِّراسة

وأخصُّ بجزيل الشُّكر والامتنان الدّكتور ساطع بدوي والدّكتور ابراهيم عطيَّة اللّذان تفضّلا بالإشراف على هذا البحث ومنحاني من وقتِهما وعلمِهما ومعرفتِهما الكثير وكان ليَ الفخرُ أن أنهلَ من خبرتِهما العلميِّة والعمليِّة

إهـــداء

لأنَّنا بهِ نحيا ونتحرَّك ونوجد ... ربِّي وإلهي

مَنْ بفضلها ورضاها أحرزتُ جميعَ نجاحاتِ حياتي ... أُستاذَتي الأولى في الحياةِ والعِلمِ أمي

مَنْ عمل كثيراً لأجلنا ... المهندسُ الأولُ في حياتي أبي

مَنْ بهم أفتخر ... سَنَدي وفَرَحي في الحياة ... نجوميَ المضيئة أخواتي وأخي

مصدرُ قوتي ... مَنْ كان مثالاً للإصرارِ والصبرِ والنجاح ... شريكُ حياتي زوجي

مَنْ رافقوني على دربِ العلمِ وطريقِ الدراسة ... صديقاتي وأصدقائي

مَنْ يملكونَ في قلبي مكانةً خاصة ... معَ محبتي

المحتويات	رقم الصفحة
الفهرس	I
قائمة الجداول	1
قائمة الأشكال والرسوم البيانية	3
المستخلص	11
الفصل الأول: الجسور الحجرية	
1-1- مقدمة	12
1-2- مشكلة البحث	13
1-3- هدف البحث وأهميته	16
الفصل الثاني: الاستعراض المرجعي والدراسات السابقة	19
الفصل الثالث: مواد إنشاء الجسور الحجرية	
3-1- مقدمة	21
3-2- الحجر ومواصفاته	21
3-3- مواد الربط ومواصفاتها (الملاط)	33
الفصل الرابع: الأضرار والعيوب والكشف عن أسبابها	
4-1- مقدمة	36
4-2- تعريف الأضرار والعيوب الموجودة في الجسور الحجرية	37
4-2-1- الأضرار التي يتعرض لها القسم السفلي من المنشأ (الأساس)	39
4-2-2- الأضرار التي يتعرض لها القسم العلوي من المنشأ	50
4-2-3- الأضرار التي تتعرض لها المواد	56
4-3- اكتشاف الأضرار والكشف عنها وتشخيصها	69
4-3-1- أضرار الركائز الوسطية	69
4-3-2- أضرار الركائز الطرفية	71

4-3-3- أضرار جدران الأجنحة والجدران الجانبية	74
4-3-4- أضرار جسم القوس	75
4-4- الأضرار الناتجة عن ضعف المتانة	81
4-4-1- التأثيرات الخارجية (Action)	84
4-4-2- المواد	90
4-4-3- وصف عمليات التدهور والتراجع	94
4-4-4- الأضرار الناتجة	97
الفصل الخامس: معاينة الجسر وتقييم حالته الراهنة	
5-1- مقدمة	105
5-2- طرائق المعاينة (Inspection Routines)	107
5-2-1- طرائق المعاينة البصرية (visual inspection)	108
5-2-2- التجارب غير التخريبية (Non-destructive testing)	110
5-2-3- التجارب المخبرية (اختبارات التحميل) (Load Testing)	112
5-3- تقييم الحالة الراهنة	117
5-3-1- طرائق التقييم (Evaluating Methods)	117
5-3-2- تصنيف حالة الجسر بعد معاينته وتقييم وضعه	123
5-4- قابلية تدهور الجسور الحجرية عند تعرضها للزلازل	126
5-4-1- الضرر الزلزالي على الجسور الحجرية	126
5-5- خاتمة	128
الفصل السادس: الترميم وإعادة التأهيل	
6-1- مقدمة	129
6-2- طرائق الترميم	130
6-2-1- تدعيم الجدران فوق القوس	131

6-2-2- صيانة وتدعيم الركائز والدعامات	131
6-2-3- صيانة الأساس	133
6-2-4- التدعيم بالحقن (Injections)	134
6-2-5- الحقن بالتوتيد (Pinning technique)	135
6-2-6- تقنية إعادة الملئ (Repointing)	135
6-2-7- تقنية استبدال الوحدات الحجرية (Replacing Units)	136
6-2-8- تقنية الإسناد (Saddling)	137
6-2-9- الخرسانة المرشوشة (Sprayed Concrete)	138
6-3- خاتمة	139
الفصل السابع: برمجيات التحليل الإنشائي للجسور الحجرية (حالة دراسية–جسر قم غرز)	
برمجيات التحليل الإنشائي للجسور الحجرية	
7-1- مقدمة	140
7-2- خصائص برنامج (GEO 3.2)	144
7-2-1- معامل الكفاية ومعامل الأمان (Adequacy Factor and Factor of Safety)	144
7-2-2-خصائص نماذج المواد	147
7-2-3-الإجهادات وعزوم الانعطاف	148
7-2-4- الضغط وتوزع القوة (Pressure and Force Distributions)	149
7-2-5-كثافة العقد (Nodal Density)	149
7-2-6-خطوط الانزلاق (Slip-lines)	151
7-2-7- نمذجة الأحمال الزلزالية باستخدام تقنية (DLO:Modeling of Seismic Loading Using)	152
7-3-حالة دراسية–جسر قم غرز	153
7-4-مراحل الدراسة	158

7-4-1- المرحلة الأولى: تحديد المكان الأخطر للعربة	158
7-4-2- المرحلة الثانية: دراسة تحمل الجسر للأحمال الأفقية	161
7-4-3- المرحلة الثالثة: تزامن الحمل الديناميكي والشاقولي	163
7-4-4- المرحلة الرابعة: التدعيم	164
7-5- دراسة قيم القوى الداخلية	174
الفصل الثامن: النتائج والتوصيات	186
الملاحق	
الملحق /1/: تعاريف العناصر الخاصة بالجسر الحجري	187
الملحق /2/: أشكال الانهيار المرافقة للجدول (7-3)	194
الملحق /3/: أشكال الانهيار المرافقة للجدول (7-4)	201
المراجع	204
المستخلص باللغة الإنكليزية	207

الصفحة

الجدول (3–1)	قيم الوزن النوعي للمواد	23
الجدول (3–2)	الكتلة الحجمية لبعض أنواع الحجر	25
الجدول (3–3)	القيم العددية التي تعبر عن النسبة المئوية لمسامية بعض أنواع الأحجار	26
الجدول (4–1)	أنماط القصور العائدة للعلاقة $\tau-\sigma$	57
الجدول (4–2)	قيم الوزن النوعي للحجر وفق بعض المراجع	91
الجدول (5–1)	التقييم العام لطرائق الأداء وفق (Hughes & Balckler 1997)	121
الجدول (5–2)	درجات العيوب في الجسور الحجرية وفق النورم الفرنسي	123
الجدول (7–1)	قيم أبعاد عناصر الجسر/الواحدة /mm/.	153
الجدول (7–2)	مواصفات المواد	154
الجدول (7–3)	قيم الحمولة الحدية لانهيار الجسر حسب تغير مكان وجود العربة.	158
الجدول (7–4)	قيم معامل الكفاية الزلزالي عند وجود الحمولة الشاقولية التصميمية من أجل تغيير زاوية الاحتكاك ومعامل التماسك للتربة.	165
الجدول (7–5)	قيم معامل كفاية الأحمال الشاقولية عند وجود الزلزال التصميمي من أجل تغيير زاوية الاحتكاك ومعامل التماسك للتربة.	166
الجدول (7–6)	قيم معامل الكفاية الزلزالي للجسر من أجل تغيير معامل التماسك للتربة.	168
الجدول (7–7)	قيم معامل الكفاية للأحمال الشاقولية للجسر من أجل تغيير معامل التماسك للتربة.	168
الجدول (7–8)	قيم معامل الكفاية للمعامل الزلزالي الأفقي للجسر من أجل تغيير معامل التماسك للتربة.	170
الجدول (7–9)	قيم معامل الكفاية للأحمال الشاقولية من أجل تغيير معامل التماسك للتربة.	171

الجدول (7-10)	قيم معامل الكفاية للأحمال الشاقولية من أجل التدعيم بزيادة عرض الركيزتين الطرفيتين.	172
الجدول (7-11)	قيم معامل الكفاية للمعامل الزلزالي الأفقي من أجل التدعيم بزيادة عرض الركيزتين الطرفيتين.	173
الجدول (7-12)	قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الأولى.	176
الجدول (7-13)	قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الثانية.	178
الجدول (7-14)	قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الخامسة.	180
الجدول (7-15)	قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة السادسة.	183

الصفحة

الشكل (1-1)	التطور التاريخي لشبكة الخطوط الحديدية في سوريا	13
الشكل (1-2)	جسر دركوش القديم قبل تهدمه	14
الشكل (1-3)	جسر دركوش القديم بعد تهدمه وبقاء ركائزه الثلاث	15
الشكل (1-4)	ركيزة جسر دركوش الباقية على الضفة اليسرى للنهر	15
الشكل (1-5)	جسر دركوش البيتوني الذي بني بعد انهيار الجسر الأصلي	16
الشكل (2-1)	طرائق التدعيم المستخدمة وفق دراسة (WERNER, Thomas. MORRIS, David.2010)	20
الشكل (3-1)	شكل يوضح مدخلات علاقة عامل يونغ	31
الشكل (3-2)	منحني المرونة	32
الشكل (3-3)	انهيار الملاط: (a) انهيار الملاط بسبب الشد؛ (b) انزلاق الملاط.	35
الشكل (3-4)	ميكانيزم انهيار الحجر: (a) تشقق مباشر بسبب الشد؛ (b) تشققات طولية بسبب الضغط؛ (c) التشقق الملاط بسبب الشد؛ (d) التشقق المائل للحجر بسبب الشد؛ (e) التشقق المتدرج للحجر بسبب الشد.	35
الشكل (4-1)	الأضرار المحتمل حدوثها في أساسات الجسور الحجرية القوسية	41
الشكل (4-2)	أساس حجري متدهور	42
الشكل (4-3)	تكشُّف الأساس نتيجة فقدان عناصر الحماية وتآكل المواد	43
الشكل (4-4)	كشط وتعفن الركائز الخشبية	45
الشكل (4-5)	تآكل العناصر المعدنية المستخدمة في التدعيم	46
الشكل (4-6)	أمثلة عن تأثر سرير النهر	47
الشكل (4-7)	الحت العام والموضعي في سرير النهر	47
الشكل (4-8)	تأثير الحت الموضعي على الركيزة الوسطية	48

الشكل (4–9)	تأثير الحت الموضعي على الركيزة الطرفية	49
الشكل (4–10)	الأضرار الأكثر شيوعاً في المنشأ	51
الشكل (4–11)	مثال عن عدم تناظر المسار في المقطع العرضي للجسر	53
الشكل (4–12)	هبوط الركيزة الوسطية والأضرار الناتجة عنها	54–58
الشكل (4–13)	تأثير موجة الضغط على السطح الخارجي لكل من جسم القوس والجزء فوقه. (a) تأثير حمل الصدم؛ (b) تأثير الحمل المتكرر.	55
الشكل (4–14)	الأضرار الناتجة عن دوران قاعدة الركيزة الوسطية (آلية الانهيار)	58
الشكل (4–15)	حركة جسم القوس والركيزة باعتبارهم عناصر صلبة مستقلة	59
الشكل (4–16)	العلاقة بين الحركة الشاقولية للتاج وزاوية دوران قاعدة الركيزة α.	60
الشكل (4–17)	الضغط الأعظمي على الركيزة الطرفية ومحصلتها	61
الشكل (4–18)	الضرر الحاصل في جسم القوس والأجزاء المحيطة به نتيجة دوران الركيزة الطرفية باتجاه الردم وتشكل ثلاثة مفاصل	61
الشكل (4–19)	الأضرار الحاصلة في جسم القوس والركائز الطرفية نتيجة دوران الركيزة الطرفية نحو الداخل	62
الشكل (4–20)	الهبوط التفاضلي أو الدوران العرضي على المحور الطولي للركيزة الوسطية أو الطرفية	63
الشكل (4–21)	الهبوط النسبي للواجهة الطولية للجسر	64
الشكل (4–22)	التشقق الشاقولي في الركيزة الوسطية بسبب الهبوط التفاضلي بين أطراف الركيزة وجزئها المركزي	65
الشكل (4–23)	المخطط الإنشائي لجسر حجري مائل يؤدي لمشاكل تسبب تشوه الركيزة الوسطية	66
الشكل (4–24)	مستويات الردم الصلبة، وجود بقع ماء	68
الشكل (4–25)	التشققات الشاقولية في الركيزة الوسطية	69

الشكل (4-26)	التشقق المتدرج في الركيزة	70
الشكل (4-27)	التشققات الشاقولية بين الـــ cutwater والركيزة الوسطية	70
الشكل (4-28)	التشققات الشاقولية في الركيزة الطرفية	71
الشكل (4-29)	التشققات الأفقية في الركيزة الطرفية	71
الشكل (4-30)	انتفاخ الجزء فوق القوس	72
الشكل (4-31)	انزلاق الجزء فوق القوس	72
الشكل (4-32)	دوران الجزء فوق القوس	73
الشكل (4-33)	التشققات المتدرجة في الجزء فوق القوس	73
الشكل (4-34)	دوران وانتفاخ جدران الأجنحة والجدران الجانبية	74
الشكل (4-35)	التشققات الطولية عند العقدة بين الركيزة الطرفية وجـــدران الأجنحـــة والجدران الجانبية	75
الشكل (4-36)	التشققات المتدرجة في جدران الأجنحة أو الجدران الجانبية	75
الشكل (4-37)	التشققات الطولية في جسم القوس	76
الشكل (4-38)	التشققات الطولية بين الشرائح وجسم القوس	76
الشكل (4-39)	التشققات القطرية في جسم القوس الناتجة عـــن الـــدوران التفاضـــلي للركيزة	77
الشكل (4-40)	آلية حدوث الانهيار بتشكل أربعة مفاصل (آلية القوس الواحدة)	78
الشكل (4-41-1)	هبوط الركيزة الوسطية والأضرار الناتجة عنها	78
الشكل (4-41-2)	حدوث الانهيار بسبب تشكل المفاصل وحدوث القص	78
الشكل (4-42)	حدوث الانهيار بسبب تشكل سبعة مفاصل وفق آلية الأقواس المتعددة	79
الشكل (4-43)	تساقط القطع الحجرية من جسم القوس	79
الشكل (4-44)	ميكانيكية قصور الحجر. المعيار I	80
الشكل (4-45)	ميكانيكية قصور الحجر. المعيار II	81

الشكل (4-46)	ميكانيكية قصور الحجر. المعيار lll	81
الشكل (4-47)	تدهور المواد المستخدمة في البناء	82
الشكل (4-48)	مخطط يوضح المنهجية المستخدمة لدراسة الأضرار الناجمة عن ضعف المتانة	83
الشكل (4-49)	تصنيف التأثيرات	84
الشكل (4-50)	تأثير الجليد على الجسر	86
الشكل (4-51)	تشكل القشور السوداء على الحجر	88
الشكل (4-52)	تشكل الأشنيات على السطح الخارجي للحجر	88
الشكل (4-53)	تحلل السطح الخارجي للحجر	88
الشكل (4-54)	الأضرار التي يسببها نمو النباتات على الجسر	89
الشكل (4-55)	أمثلة عن التخريب	89
الشكل (4-56)	مثال عن تدهور جسم القوس	95
الشكل (4-57)	الأضرار الناتجة عن نمو النباتات	96
الشكل (4-58)	مثال عن حدوث البقع	99
الشكل (4-59)	مثال عن البقع وفقدان مواد الربط بين الحجر	99
الشكل (4-60)	أمثلة عن نمو الطحالب والأشنيات والفطور	99
الشكل (4-61)	مثال عن التزهر	100
الشكل (4-62)	مثال عن تشكل القشور	100
الشكل (4-63)	أمثلة عن تدهور السطح الخارجي	101
الشكل (4-64)	أمثلة عن تشكل الفجوات والثقوب	101
الشكل (4-65)	الأضرار الناتجة عن فقدان مواد الربط والحجر	102
الشكل (4-66)	أمثلة عن تساقط قطع الحجر	102
الشكل (4-67)	أمثلة عن التشققات الناتجة عن الحركات التفاضلية	103

الشكل (4–68)	عن الأضرار الناجمة عن استخدام الملاط الاسمنتي بدل الملاط الكلسي	104
الشكل (4–69)	الضرر الناجم عن تأثير صدم العربات	104
الشكل (5–1)	المراحل الستة الحرجة في دورة حياة الجسر	106
الشكل (5–2)	نموذج استمارة المعلومات	107
الشكل (5–3)	قياس التشققات في بلاطة الجسر باستخدام مسطرة القياس (0.1 مم–7مم)	108
الشكل (5–4)	التشققات في الوجه السفلي لبلاطة الجسر	108
الشكل (5–5)	حدوث تشقق بين جسم القوس والجدار فوق القوس	109
الشكل (5–6)	تشقق القوس	110
الشكل (5–7)	نمو النباتات بين قطع الحجر	110
الشكل (5–8)	أساسيات التسخين الحراري باستخدام الأشعة تحت الحمراء	112
الشكل (5–9)	شكل القوس النموذجي	114
الشكل (5–10)	الخطوات وفق طريقة MEXE	118
الشكل (5–11)	آلية المفاصل الأربعة في الأقواس الحجرية	119
الشكل (5–12)	التمثيل الخطي النموذجي للعنصر القوسي	120
الشكل (5–13)	النموذج الممثل للفشل ونماذج الطرق الأربعة الأخرى وفق (Hughes et al. 1998)	122
الشكل (5–14)	مخطط تصنيف الحالة الراهنة للجسور القائمة	124
الشكل (5–15)	مخطط استخدام مستويات التقييم	125
الشكل (5–16)	جسر حجري متضرر بعد زلزال (Bhuj)، 2001، الهند	127
الشكل (5–17)	تضرر جسر حجري بعد زلزال (Umbria&Marche) عام1997	127
الشكل (6–1–a)	جسر (Laigh Milton Viaduc) قبل الترميم	129
الشكل (6–1–b)	جسر (Laigh Milton Viaduc) بعد الترميم	130
الشكل (6–2)	تدعيم الجدار فوق القوس	131

الشكل (6-3)	جدار محدب من وجه واحد ووجهين	132
الشكل (6-4)	التدعيم بطريقة التخريم	132
الشكل (6-5)	تدعيم الأساسات الحجرية بغلاف البيتون	133
الشكل (6-6)	تدعيم الأساسات الحجرية من جهة واحدة	133
الشكل (6-7)	التدعيم باستخدام الحقن	134
الشكل (6-8)	تقنية الحقن بالتوتيد	135
الشكل (6-9)	تقنية إعادة الملء	136
الشكل (6-10)	تقنية الإسناد بتنفيذ سماكات مختلفة	137
الشكل (6-11)	تقنية الإسناد بتنفيذ سماكة موحدة	138
الشكل (6-12)	تقنية الخرسانة المقذوفة	139
الشكل (7-1)	نموذج الجسر المدروس باستخدام برنامج (RING3.0)	141
الشكل (7-2)	نافذة برنامج (GEO) والتعريف بأدوات وشرائط المهام	143
الشكل (7-3)	أمثلة عن حالات تحديد وتعديل خصائص النموذج.	143
الشكل (7-4)	نافذة تتضمن محتويات مخرجات البرنامج الموجودة في التقرير	144
الشكل (7-5)	معامل الأمان للأحمال (Method-1)	146
الشكل (7-6)	معامل الأمان لمقاومة المادة (Method-2)	147
الشكل (7-7)	الإجهادات المتشكلة في جزء من التربة وفق ميكانيزم انهيار النموذج.	148
الشكل (7-8)	مخطط توزع الضغط لجزء من التربة	149
الشكل (7-9)	تحليل (DLO) وكيفية إيجاد خطوط الانزلاق بالاعتماد على توزع العقد داخل التربة.	151
الشكل (7-10)	خصائص خطوط الانزلاق	152
الشكل (7-11)	منظر عام لجسر قم غرز.	153
الشكل (7-12)	مخطط إنشائي لجسر حجري على الخط الحديدي الحجازي	155

الشكل (7–13)	أبعاد أساسات الركائز	155
الشكل (7–14)	أبعاد وحمولة القاطرة	156
الشكل (7–15)	مخطط يبين أبعاد الجسر وتفصيلة الركيزة.	157
الشكل (7–16)	نافذة البرنامج ونموذج الجسر مع وجود أحمال شاقولية.	157
الشكل (7–17)	قيم الحمولة الحدية لانهيار الجسر المقابلة لمكان وجود العربة وفق الجدول (7–3).	159
الشكل (7–18)	الحالة الحدية الأخطر للانهيار تحت تأثير الأحمال الشاقولية التصميمية.	160
الشكل (7–19)	ميكانيزم انهيار الجسر تحت تأثير القوى الأفقية	161
الشكل (7–19–1)	تفصيل ميكانيزم انهيار الجسر تحت تأثير القوى الأفقية	162
الشكل (7–20)	ميكانيزم انهيار الجسر تحت تأثير القوى الشاقولية والأفقية	163
الشكل (7–21)	ميكانيزم الانهيار عند تعرض الجسر لحمولة شاقولية متغيرة والزلزال التصميمي من أجل تغيير زاوية الاحتكاك ومعامل التماسك للتربة	167
الشكل (7–22)	ميكانيزم الانهيار عند تعرض الجسر لقيم زلزالية متغيرة من أجل تغيير زاوية الاحتكاك ومعامل التماسك للتربة	167
الشكل (7–23)	العلاقة بين رفع كفاءة التربة وتغير معامل الكفاية عند تعرض الجسر للأحمال الخارجية.	169
الشكل (7–24)	ميكانيزم الانهيار عند تعرض الجسر لقيم زلزالية متغيرة وحمولة شاقولية تصميمية من أجل تغيير التماسك في الأقواس.	172
الشكل (7–25)	أماكن تشكل المفاصل عند حدوث ميكانيزم الانهيار تحت تأثير الأحمال الأفقية.	174
الشكل (7–26)	ميكانيزم الانهيار تحت تأثير الأحمال الأفقية والشاقولية.	175
الشكل (7–27)	عقد وأوجه العنصر	175
الشكل (7–28)	قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الأولى.	177

الشكل (7–29)	قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الثانية.	180
الشكل (7–30)	قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الخامسة.	182
الشكل (7–31)	قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة السادسة.	184

المستخلص (Abstract)

تصنف المنشآت الحجرية ضمن أبرز المنشآت في العالم لما لها من أهمية تاريخية وتراثية تجعلها تُدرج على قائمة التراث العالمية.

تتعرض المنشآت خلال فترة الخدمة للعديد من الأحمال الخارجية سواء كانت ستاتيكية أو ديناميكية وتؤثر هذه الأحمال على عمر المنشأ وفترة خدمته. تختلف مدة الخدمة بين المنشآت حسب أنواعها وتتميز المنشآت الحجرية بشكل خاص بديمومتها، إذ لوحظ على مر الزمن أن المنشآت الحجرية تبقى في الخدمة لمدة أطول من عمرها التصميمي وذلك لما تتمتع به المواد الحجرية من خاصية الديمومة.

هدف هذا البحث هو بالدرجة الأولى دراسة الوضع الراهن للجسور الحجرية (خاصة جسر قم غرز الموجود في بلدنا سوريا) بهدف معرفة الأسلوب الأنسب للترميم أو إعادة التأهيل، حيث يعود عمر العديد من هذه الجسور إلى أواخر القرن الأول الميلادي. وعلى الرغم من انتهاء عمرها التصميمي إلا أن معظمها ما زال قائماً حتى يومنا هذا.

تتضمن هذه الدراسة إيجاد منهجية لمعاينة الجسور الحجرية ومعرفة وضعها الحالي وقدرتها على تحمل التأثيرات والأحمال الخارجية خاصة الزلزالية عن طريق نمذجة الجسر المدروس وهو جسر قم غرز الواقع على نهر وادي الزيدي في درعا باستخدام برنامج (GEO3.2) لنمذجة الجسر بمواصفات مواده الحالية ونمذجة تربة التأسيس ومن ثم إخضاع النموذج لأحمال ستاتيكية وديناميكية (حسب منطقته الزلزالية). وبناء على النتائج سيكون اختيار طريقة التدعيم المناسبة التي تحمي الجسر من الانهيار على أرض الواقع مستقبلاً.

الفصل الأول: الجسور الحجرية

1-1 مقدمة البحث

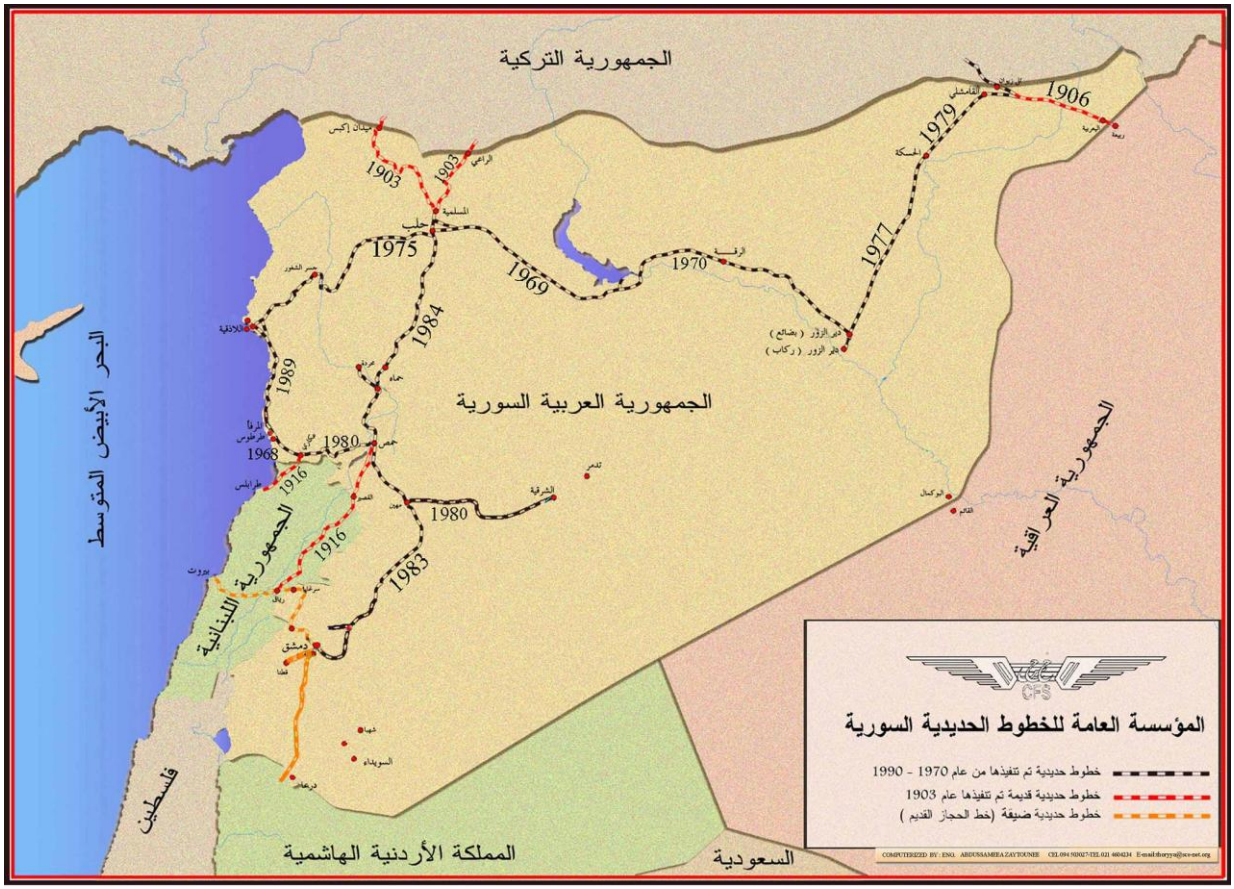
تبرز أهمية الجسور الحجرية بما لها من ديمومة وقدرة على المقاومة إذ أثبتت ذلك عبر التاريخ.

يوجد تقريباً حوالي مليون جسر حجري قوسي في العالم. جميع هذه الجسور قديمة ومعظمها تتحمل أحمال أكبر من الأحمال المصممة عليها. كشفت دراسة حديثة في إنكلترا (C. Melbourne and J. Wang, A. Tomor) [12] أن 40% تقريباً من جسور السكك الحديدية الأوروبية هي جسور حجرية قوسية وأن أكثر من 60% من هذه الجسور يصل عمرها إلى (100) سنة، كما تشكل صيانة هذه الجسور وتقييم وضعها مصدر قلق بالنسبة لمالكيها.

أما في سوريا، بنيت معظم الجسور الحجرية الموجودة فيها بين عامي (1830) و (1930)، وقد أثبتت الجسور الحجرية القوسية موثوقيتها على تحمل أحمال الطريق (الدائمة والحية)، سواء كان الجسر يعبر مجرى مائي أو لسكة حديد. ومع ذلك تواجه هذه الجسور العديد من الصعوبات المرتبطة بفترة خدمة الجسر والمتطلبات المتغيرة لأنظمة النقل الجديدة. ومن أجل ضمان الاستخدام الجيد لهذه الثروة التاريخية في المستقبل، من الضروري إدارة وصيانة هذه الجسور بعناية مع الأخذ بعين الاعتبار ضرورة فهم خصائصها واحتياجاتها. لذلك تسعى الدراسات الحديثة لإيجاد طريقة تقييم للجسور الحجرية القوسية تعطي قيماً أقرب ما يمكن لواقع الجسر، سواء كانت عن قدرة تحمل الجسر، العمر المتبقي، إمكانية صيانته وقدرته على الخدمة. (McKibbins, L; Melbourne, C; Sawar, N; Sicilia Gaillard. 2006, [25])

يعود وجود الجسور الحجرية في سوريا إلى العام /64/ ميلادي عندما احتل الرومان بلاد الشام وقاموا ببناء العديد من القلاع، الكنائس، الجسور والمواقع الأثرية الأخرى التي ما زال العديد منها موجوداً حتى الآن ويخدم حركة المواصلات والسياحة.

يعتبر الخط الحديدي الحجازي من أهم المشاريع الموجودة في سوريا الذي نُفِّذ في فترة الاحتلال العثماني، بُدأ العمل به عام (1899) وانتهى تنفيذه عام (1908) وبالتالي تعرضت جسوره للعديد من الصعوبات والتحديات متمثلة بالحرب العالمية الأولى ومرحلة الاحتلال الفرنسي، ومع ذلك مازال معظمها قائماً حتى الآن. وقد بلغ عدد الجسور على الخط الحديدي الحجازي (950) جسراً بما فيها الجسور على فروع الخط وهي في وادي اليرموك ووادي الأردن. يبين الشكل (1-1) التطور التاريخي للخطوط الحديدية في سوريا.



الشكل (1-1) التطور التاريخي لشبكة الخطوط الحديدية في سوريا [1]

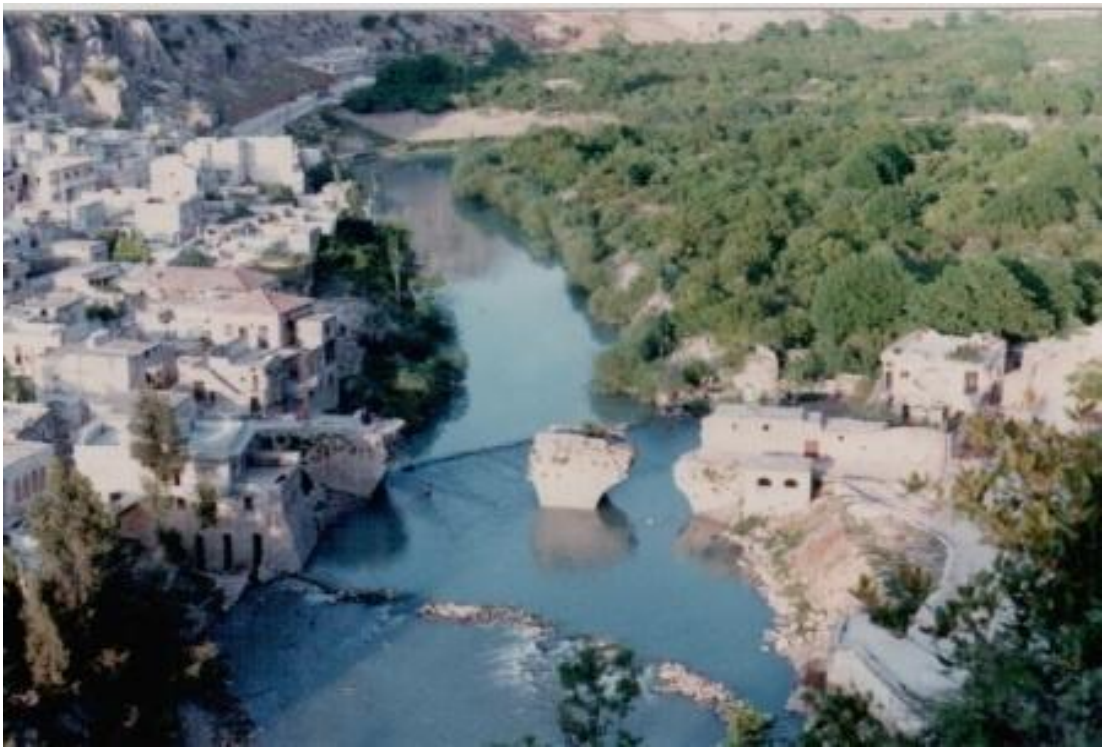
1-2- مشكلة البحث

وفقاً لقوانين الطبيعة لا يمكن أن تبقى الجسور الحجرية على وضعها إلى الأبد أياً كان الشكل الإنشائي المستخدم وأياً كانت المواد المعتمدة، وعاجلاً أم آجلاً ستبدأ آثار التدهور والتراجع بالظهور. هناك العديد من العوامل التي تؤثر على طبيعة ودرجة التدهور مثل

الشكل الإنشائي، مواد وجودة البناء، الظروف البيئية، عوامل الحت، الحرارة، التعب، الزلازل والفيضانات، الطقس والطبيعة وشدة تراكيب أحمال المرور....الخ
وبالتالي توجد حالة دائمة من القلق والخشية من انهيار الجسور الحجرية القديمة على شبكة الخطوط الحديدية وشبكة الطرق العامة في سوريا وخاصة إن كانت ذات قيمة أثرية وتاريخية ولم تخضع لعمليات الصيانة والترميم.

بني في سوريا العديد من الجسور الحجرية منذ العصر الروماني وحتى بدايات القرن التاسع عشر، منها ما يخدم مرور العربات ومنها ما يستخدم لخطوط السكك الحديدية مثل خط سكة حديد حلب–اللاذقية. [1]
نذكر مثالاً على أحد أهم الجسور هو جسر دركوش الأثري (في بلدة دركوش التي تبعد 35km غرب مدينة إدلب)، يعود بناؤه للعام 1750 كان يصل بين ضفتي نهر العاصي ونتيجة لفيضان كبير حصل عام 1952 انهار الجسر وبقيت ركائزه الثلاث فقط، وبعد فترة جرفت المياه القاعدة الوسطى وانهارت تماماً فتم بناء جسر من البيتون عقب انهيار الجسر الأصلي ليؤمن الوصل بين الضفتين مما ألغى أي تميز كان يتمتع به الجسر من صفة أثرية. [1]

الشكل(1–2) جسر دركوش القديم قبل تهدمه



الشكل(1–3) جسر دركوش القديم بعد تهدمه و بقاء ركائزه الثلاث

الشكل (1–4) ركيزة جسر دركوش الباقية على الضفة اليسرى للنهر

الشكل (1-5) جسر دركوش البيتوني الذي بني بعد انهيار الجسر الأصلي

وعلى الرغم من أهمية هذه الجسور تاريخياً وتراثياً إلا أن جزءاً كبيراً منها خرج عن الخدمة، والجزء الآخر لا يزال قائماً ويؤدي عمله لكن حالته الراهنة تطرح العديد من التساؤلات والشكوك عن العمر المتبقي لها في الخدمة. خاصة أن هذه الجسور لم تتم معاينتها ولم يجر عليها أية أنواع من الصيانة رغم البيئة والظروف المناخية المحيطة بها. وهذا يترك في الذهن العديد من التساؤلات:

ما هو وضع هذه الجسور الآن؟ هل مازالت في الخدمة؟ ما هي قدرتها على تحمل الأحمال الديناميكية وخاصة الزلزالية؟ هل من الممكن إعادة تأهيلها وترميمها دون تغيير خصائصها وصفاتها الأساسية؟ وفي هذه الحالة ما هي الأساليب المناسبة لتحقيق ذلك؟

1-3- هدف البحث وأهميته

يهدف البحث لإيجاد حل للمشكلات وجواباً على التساؤلات المطروحة. وتتجلى أهمية هذا البحث بأهمية إعادة تأهيل المنشآت الحجرية القديمة وخاصة الجسور الحجرية بما تشكله من إرث حضاري وتاريخي للمنطقة، إذ إن سوريا ونتيجة لموقعها الجغرافي كانت تشكل

على مرِّ العصور نقطة ربـــط بين عواصم الحضـــارات الـــقديمـــــة وممـــراً للقوافـــــل التجـــارية مما استدعى الحاجة لإنشاء العديد من الجسور لتسهيل الحركة من اجل لمـــرور فوق الأنهار واجتياز الوديان والسهول.

وانطلاقاً من ندرة الدراسات (المحلية والعالمية) التي تبحث في "الجسور الحجريـــة" وأثـــر "الزلازل" عليها ونظراً لوجود العديد من الجسور الحجرية في سوريا تـــأتي أهميـــة هـــذا البحث لتسلط الضوء على العديد من التساؤلات.

ويتم ذلك بتحقيق النقاط التالية:

- وضع قاعدة بيانات كاملة عن الجسر المطلوب دراسته لتوثيقه وأرشفته.
- تقييم الحالة الراهنة للجسر المدروس.
- التحليل الإنشائي للجسر ومحاولة معرفة سلوكه تحت تأثير مختلف أنواع الأحمال.
- البحث عن طريقة تأهيله.

وحتى الآن ينظر بعض الأشخاص لهذه الجسور بوصفها تحفاً دائمة دون أن يدركوا أنهـــا عرضة للتلف وتحتاج إلى نوع خاص من الرعاية والاهتمام.حيث تشير مشاكل التـــدهور التي تحدث الآن إلى الفشل في إدارة هذه الجسور إضافة إلى تراكم سنوات طويلـــة مـــن الإهمال فيما يخص تمويل وتنفيذ الصيانة بشكل مستمر للحفاظ على الجسور القديمة.

وعليه تركِّز هذه الدراسة على تحقيق الهدف لحل المشكلة أي في إمكانية تـــرميم وإعـــادة تأهيل الجسور الحجرية بهدف المحافظة على الإرث التاريخي لها لما كانت تشـــكله مـــن أهمية عبر القرون الماضية والحرص على بقائها في الاستثمار أطول فترة ممكنـــة. مـــن خلال معرفة خصائص وميزات الجسور الحجرية القوسية بحالتها الراهنة عن طريق وضع استمارة موحدة تشمل جميع النقاط اللازم معرفتها عن أي جسر وتضـــم كامـــل البيانـــات المتعلقة به بما يساعد على توثيقه وأرشفته، وهذا يساعد في عملية تقييم حالتـــه الراهنـــة، معرفة عمليات الصيانة والإصلاحات التي تم إجراؤها عليه إن وُجدت، معرفـــة الطريقـــة

الأفضل لإدارة الجسر من قبل المسؤولين عنه، معرفة طرق إعادة التأهيل المستخدَمة والتي يمكن تطبيقها على الجسر وذلك دون التغيير من معالمه التاريخية والأثرية.

كما تسعى لمعرفة قدرة هذه الجسور الحجرية(القائمة) على مقاومة الأحمال الديناميكية، حيث تم تصميمها أساساً على الأحمال الدائمة والمتحركة، لكنها في الواقع معرضة للزلازل.

الفصل الثاني: الاستعراض المرجعي والدراسات السابقة

- جرت دراسة في جامعة دمشق بهدف تقييم الحالة الراهنة للجسور الحجرية القوسية عن طريق إجراء معاينة ميدانية لجسر قم غرز في درعا ومن ثم إجراء تقييم جدولي لبيان درجات العيوب الموجودة فيه وفق النورم الفرنسي. لكن هذه الدراسة لم تتطرق لأثر الحمولات الديناميكية. [2].
- عام (2008) قامت شركة بريطانية بإجراء تقرير تقييمي عن جسر (Second Narrows Bridge)، شمل التقرير تقييم كامل لمعاينة الجسر، وضع نموذج إنشائي للجسر وإنشاء برنامج باستخدام نظرية العناصر المحدودة ثلاثي الأبعاد لإجراء تحليل للجسر والحصول على النتائج.(BRITSH COLUMBIA, 2008) [11].
- كما ركزت دراسة في إيطاليا على تعرض الجسور الحجرية القوسية للزلازل وهي مصممة أساساً على الأحمال الدائمة (الجاذبية)، بينما هي في الواقع معرضة للزلازل. وقد تم إجراء دراسة لجسر حجري طول فتحة مجازه (11m) والذي يمثل جسر نموذجي في إيطاليا. من أجل الحالة المدروسة تم تقييم إمكانية تعرض الجسر للأذى بسبب الزلازل من خلال التحقق من القوس في المنتصف وعند المساند. تلخصت الدراسة بإجراء مقارنات بين التسارع الأرضي الأفقي الفعلي والتسارع الأرضي الأفقي الحدي المسبب للانهيار. وكانت النتيجة بالحصول على منحني الطلب بالاعتماد على جهاز قياس التسارع (accelerograms) والناتج عن أسوأ زلزال حدث في إيطاليا. لم تتطرق الدراسة لطرائق التدعيم وإعادة التأهيل. (Bhatti, Abdul Qadir, 2009) [9].
- جرت دراسة مهمة باستخدام الماسح الضوئي الليزري (WERNER, Thomas. (MORRIS, David, 2010) [31] على العديد من الجسور الحجرية وشملت عدة طرائق للتدعيم وإعادة التأهيل مثل إضافة ركائز شبكية معدنية، إضافة جوائز تدعيم معدنية، تدعيم القوس بطبقة بيتون إضافية بالبيتون المقذوف أو بإضافة قوس مسبق الصنع ليدعم القوس الأصلي. لكن جميع هذه الطرق لم تراعِ الحفاظ على الشكل الخارجي للجسر الحجري قبل التدعيم ولم تتطرق الدراسة للتأثير الديناميكي.

الشكل (2–1) طرائق التدعيم المستخدمة وفق دراسة

[31] (WERNER, Thomas. MORRIS, David.2010)

- في عام (2014) نُشرت مقالة لدراسة هندية عن سلوك انهيار جسر قوسي حجري بفتحة واحدة باستخدام نظرية العناصر المحدودة. كانت النتيجة أن الانهيار يحصل عند زيادة شدة الحمل المطبق إلى ($600KN/m^2$) عند (5/8) من فتحة المجاز، وتمثلت النتائج بقيم الإجهادات الناتجة في كل من الوجه الداخلي والخارجي للقوس وعلى طول نقاط الاستناد. لكن هذه الدراسة لم تتحدث عن تأثير وجود تدعيم على سلوك الجسر. (Raj, Sera Elsa., Srinivas, V., Eapen Sakaria, P, 2014) [27].

مما سبق يُلاحظ بأن أياً من الدراسات السابقة لم تكن شاملة لذلك كان من الضروري إجراء دراسة شاملة تبدأ بتقييم الوضع الراهن لجسر حجري، يليها إجراء دراسة تحليلية لهذا الجسر تحت تأثير الأحمال الشاقولية والأفقية لمعرفة القيم الحدية لها التي تسبب انهيار الجسر ومن ثم إجراء ترميم وتدعيم الجسر ليقاوم الأحمال الخارجية التي تهدد وجوده ليبقى ضمن الخدمة أكبر فترة ممكنة وللحفاظ على هذا الجسر لما له من أهمية تاريخية أو أثرية.

الفصل الثالث: مواد إنشاء الجسور الحجرية

3-1- مقدمة

تعتبر مادة الحجر من أقدم المواد التي استخدمت للبناء. وعلى الرغم من ظهور العديد من مواد الإنشاء الحديثة كالبيتون والفولاذ إلا أن العديد من المباني الحجرية بقي مستخدماً حتى الآن لما تتمتع به المنشآت الحجرية من طابع تاريخي وحضاري لمنطقتنا وخاصة الجسور الحجرية إذ إن العديد منها كان قد بني من قبل الصينيين أو الرومان قبل القرن التاسع عشر وخاصة الجسور الموجودة على الخط الحديدي الحجازي الذي كان إنشاؤه حدثاً هاماً على الصعيد العالمي نظراً لكونه يصل العديد من البلدان من جهة ولكونه يحتوي على العديد من الجسور الحجرية مختلفة المواصفات والتصاميم.

تُعتَبر الأحجار من أقدم مواد البناء المعروفة في العالم نظراً لخواصها المميزة والمفيدة للاستخدام الإنشائي، ومع تقدم وتطور الدراسات قل استخدام الحجر إذ وُجد العديد من المواد الحديثة معروفة السلوك والخصائص. تتكون المنشآت الحجرية من القطع الحجرية التي تربط فيما بينها المواد الرابطة.

3-2- الحجر

يعرف الحجر بصفة عامة بأنه مادة صلبة طبيعية تتكون من تجمع معدني من أكثر من معدن وفى أحوال محدودة يتكون من معدن واحد ويطلق عليه في هذه الحالة بأنه صخر وحيد المعدن (Monomineralic Rock). تختلف الصخور فيما بينها اختلافاً كبيراً ويتوقف هذا الاختلاف على عدة عوامل أهمها:

1- المحتوى المعدني للحجر (Mineral Content).

2- كيفية نشأة الحجر (Mode of origin).

3- كيفية تواجدها (Mode of occurrence).

كما تختلف مواصفات الأحجار الطبيعية وخصائصها حسب منشأ كل منها، وعليه تم تصنيف الأحجار المستخدمة وفقاً لطريقة تكونها طبيعياً والتي تقسم إلى:

- الصخور النارية: الغرانيت (Granit)، البازلت (Basalt).
- الصخور الرسوبية: الحجر الجيري (Pierre calcaire)، الحجر الرملي.

- الصخور المتحولة: الرخام (Marble)، الإردواز، الحجر الأخضر.

الصفات العامة لحجر البناء

تقسم صفات الأحجار إلى صفات فيزيائية وكيميائية وميكانيكية. تضم الصفات الفيزيائية **(Physical properties)** التجانس والقساوة والكتلة الحجمية الظاهرية والخصائص التي ترتبط بالماء كالمسامية والنفوذية والاشباع بالماء (كمية الماء الحرجة) ومقاومة التجمد.
الصفات الكيميائية **(Chemical properties)** تعبر عن تأثر الأحجار بالعوامل الخارجية على مختلف أنواعها وتفاعلها مع مواد البيئة. أما الصفات الميكانيكية (**Mechanical properties)** فهي مقاومة الحجر للضغط ومقاومته للقص بنوعيه الستاتيكي والديناميكي أي مقاومته للاهتزاز والصدمات وكذلك مقاومته للاستهلاك أي قدرته على الاستمرار في تحمل الأحمال المطبقة عليه ومن ثم قدرته على الالتحام بمختلف أنواع الروابط.

سوف نستعرض الخصائص الأكثر شيوعاً واستخداماً والأكثر ارتباطاً بموضوع دراستنا. (مواد البناء واختباراتها) [3]،(مواد البناء واختباراتها) [4]،(مواد البناء) [7].

1- الوزن النوعي (Specific weight)

وهو هو وزن وحدة الحجم من مادة. يعرف أيضاً باسم واحدة الوزن ويرمز له بالرمز (γ) واحدته (kg/m^3).

تعطى الصيغة العامة للوزن النوعي بالعلاقة:

$$\gamma = \rho.g \qquad (3\text{-}1)$$

حيث:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{V_g} \qquad (3\text{-}2)$$

(ρ) كثافة المادة (الكتلة في واحدة الحجم، تؤخذ واحدتها بـ kg/m^3)

(g) تسارع الجاذبية (معدل تغير السرعة، تؤخذ واحدتها بـ m/s^2)

(m) الكتلة (kg)

(v) الحجم واحدته m^3

(v_g) الحجم النوعي واحدته m^3/kg

يعتمد الوزن النوعي للصخور على كثافتها، حيث أثبتت التجارب التي أجريت على عينات كثيرة انه كلما زادت نسبة المعادن الثقيلة في الصخر كلما زاد وزنه النوعي ويلاحظ وجود علاقة عكسية بين الوزن النوعي والمسامية للصخور. فالصخرة ذات الوزن النوعي المرتفع تملك مسامية منخفضة، وعندما يكون الوزن النوعي للصخور منخفض فان قابليته لتوصيل الأمواج الصوتية قليلة ومقاومته للتجمد منخفضة.

يبين الجدول (3–1) قيمة الوزن النوعي لبعض المواد.

الجدول (3–1) قيم الوزن النوعي للمواد

Material - powder, ore, solids, etc.	Kg/m^3	Material - powder, ore, solids, etc.	Kg/m^3
Asphalt, crushed	721	Marble, solid	2563
Basalt, solid	3011	Marble, broken	1570
Brick, common red	1922	Marl, wet, excavated	2243
Brick, fire clay	2403	Mica, solid	2883
Brick, silica	2050	Mica, broken	1602
Brick, chrome	2803	Mica - flake	520
Brick, magnesia	2563	Mica - powder	986
Cement - clinker	1290-1540	Milk, powdered	449
Cement, Portland	1506	Molybdenum ore	1600
Cement, mortar	2162	Mortar, wet	2403
Cement, slurry	1442	Mud, packed	1906
Clay, dry excavated	1089	Mud, fluid	1730
Clay, wet excavated	1826	Nickel ore	1600
Clay, dry lump	1073	Nickel, rolled	8666
Clay, fire	1362	Nickel silver	8442
Clay, compacted	1746	Nitrogen	1.26
Concrete, Asphalt	2243	Phosphate rock, broken	1762

Concrete, Gravel	2403	Phosphorus	2339
Concrete, Limestone with Portland	2371	Quartz, solid	2643
Feldspar, pulverized	1233	Quartz, lump	1554
Halite (salt), solid	2323	Quartz sand	1201
Halite (salt), broken	1506	Rock - soft - excavated with shovel	1600-1780
Hematite (iron ore)	5095 - 5205	Sand, wet	1922
Iron ore - crushed	2100-2900	Sand, wet, packed	2082
Iron oxide pigment	400	Sand, dry	1602
Iron Pyrites	2400	Sand, loose	1442
Iron sulphate - pickling tank - dry	1200	Sand, rammed	1682
Iron sulphate - pickling tank - wet	1290	Sand, water filled	1922
Lime, quick, lump	849	Sand with Gravel, dry	1650
Lime, quick, fine	1201	Sand with Gravel, wet	2020
Lime, stone, large	2691	Sandstone, solid	2323
Lime, stone, lump	1538	Sandstone, broken	1370-1450
Lime, hydrated	481	Stone, crushed	1602
Lime, wet or mortar	1540	Stone (common, generic)	2515

2- التجانس (Homogeneity)

وهي صفة هامة يجب توفرها في أحجار البناء إذ إن وجود أي عيب داخلي فيها قد تكون له نتائج سيئة على مقاومة الحجر. تسمح المعاينة الأولية للأحجار بمعرفة عدم التجانس إذ يجب أن نتجنب التكوينات غير المتجانسة فيها، كما نتجنب الأجزاء الرخوة (الحفر، المواد عضوية)، التكهفات المليئة بالهواء أو بالماء، كما نتجنب الأحجار التي فيها

شقوق أو كسور. ويمكن تحديد تجانس عينة ما باستخدام سرعة انتشار الصـــوت فيهـــا إذ يمكننا من اكتشاف العيوب التي تحتويها والتي لم تستطع المعاينة البصرية كشفها.
تتعلق سرعة انتشار الصوت بكتامة الحجر، إذ تكون بطيئة في الأحجار الطرية والمسامية.

3- الكتلة الحجمية (Volumetric Mass)

وتعرف بأنها نسبة وزن الكتلة الجافة للعينة إلى حجمها الظاهري وتعطى بالعلاقة:

$$\rho = \frac{P_1}{V_{app}} \qquad (3\text{-}3)$$

وتعرف المسامية الحقيقية بأنها نسبة حجم الفراغات في كتلة حجرية إلى حجمها الظاهري.

$$p = \frac{V_v}{V_{app}} \qquad (3\text{-}4)$$

ويمكننا بالتالي تعريف درجة تراص الأحجار بأنها نسبة حجم الأجزاء المليئة من المادة إلى حجمها الظاهري الكلي:

$$C = \frac{V_{app} - V_v}{V_{app}} = \frac{V_m}{V_{app}} \qquad (3\text{-}5)$$

ويجب الانتباه أن مجموع نسبتي المسامية والتراص لا يساوي الواحد أبداً بســـبب وجـــود النسيج الداخلي للحجر.
تتراوح الكتلة الحجمية الظاهرية للأحجار تقريبا كما في الجدول (3–2).

الجدول (3–2) الكتلة الحجمية لبعض أنواع الحجر.

نوع الحجر	الكتلة الحجمية الظاهرية (kg/m^3)
الأحجار الكلسية	1500 – 2800
الغرانيت	2400 – 3000
البازلت	2700 – 3000
المرمر	2600 – 2800

4- المسامية (Porosity): نميز نوعين من المسامات:

- **المسامات المنعزلة (Isolated pores):** وهي المسامات التي تشكل جيباً هوائياً منعزلاً تحصره جدران من المادة.

- **المسامات المفتوحة (Open pores):** وهي المسامات التي تتصل فيما بينها وتكون مفتوحة على الهواء الخارجي.

إن المسامات المفتوحة هي التي تدخل في قياس الكتلة الحجمية الظاهرية ودرجة تراص الأحجار. ويعبر عن المسامية بنسبة مئوية لحجم الفراغات التي يدخلها الماء إلى الحجم الظاهري.

تُعرَّف المسامية المطلقة للأحجار بأنها نسبة حجم المسامات الكلي إلى الحجم الظاهري للحجر. أما التعريف الشائع هو النسبة المئوية لكتلة الماء الذي تمتصه العينة إلى كتلتها الجافة خاطئ ويجب أن تدعى النسبة المئوية لتشرب الماء (عامل امتصاص الماء). والمسامية الفعلية هي حجم الماء الممتص إلى حجم العينة الظاهرية. وبين هذين التعريفين عامل هو الكتلة الحجمية الظاهرية للعينة.

مثلاً، إذا كان عامل امتصاص حجر ما (20 %) وكتلته الحجمية ($0.5\ kg/m^3$) تكون مساميته (40 %).

ويبين الجدول (3-3) القيم العددية التي تعبر عن النسبة المئوية لمسامية بعض أنواع الأحجار.

الجدول (3-3) القيم العددية التي تعبر عن النسبة المئوية لمسامية بعض أنواع الأحجار.

الحجر	النسبة المئوية
الغرانيت	0-2%
المرمر والأحجار الكلسية القاسية	2-5%
أنواع الأحجار الكلسية الأخرى	5-50%

5- النفاذية (Permeability)

وهي قابلية الأحجار لأن يخترقها الماء. يتعلق ذلك بسماكة الحجر ومساماته وطبيعة الماء ودرجة حرارته (إذ تتغير لزوجته بتابع درجة الحرارة).

ويمكن أن تتأثر النفوذية بالعوامل التالية:

- تنقص النفوذية مع زيادة لزوجة السائل.
- تنقص النفوذية مع زيادة عرض الحجر.
- تزداد النفوذية مع ازدياد الحمولة الهيدروستاتيكية.
- تزداد النفوذية اذا ازدادت المسامية عندما تبقى الأقطار الوسطية للمسامات ثابتة (يجب عدم الخلط بين ضعف نفوذية الأحجار وممانعتها للرشح).

6- المتانة (Durability)

وهي قدرة الصخر على مقاومة العوامل والظروف الخارجية الطبيعية والتي قد تؤدي إلى تغيير بعض صفات الصخر (مثل تأثير الأمطار الذي قد يسبب حدوث فجوات في الصخر).

7- الإشباع بالماء/ درجة التشبع (Saturation)

إن دراستنا لمسامية الحجر ودرجة إمساكه بالماء إضافة لخاصية الامتصاص الشعري فيه تساعدنا على معرفة مدى مقاومته لفعل التجمد. يدرس الامتصاص الشعري على مكعبات مخبرية جففت تماما حتى الكتلة الثابتة ثم تغمر قاعدتها بالماء لتبدأ بعدها خاصة الامتصاص الشعري بالعمل فيرتفع الماء شاقولياً أو أفقياً وفقاً لوضع العينة إن كانت موازية للسرير الطبيعي أو متعامدة معه، وبعد عدة وزنات تفصل بينها مدد زمنية ثابتة يمكن تحديد الامتصاص الشعري بالعلاقة التالية:

$$E_c = 100 \times \frac{m_t - m_1}{m_t} \qquad (3\text{-}6)$$

حيث: (E_c) عامل الامتصاص الشعري للعينة

(m_1) كتلة العينة الجافة

(m_t) كتلة العينة بعد زمن t من بدأ التجربة

ويعطي النظام الفرنسي (NF B10-502) خاصة الامتصاص الشعري للحجر بالعلاقة:

$$C = 100 \times \frac{M}{S\sqrt{t}} \qquad (3\text{-}7)$$

حيث: M الكتلة الكلية الممتصة (g)

t الزمن الكلي منذ بدء التجربة (min)

S مقطع قاعدة العينة (cm^2)

وتتميز خاصية الامتصاص الشعري لكل عينة بعاملين:

- عامل امتصاص شعري للعينة في وضع متعامد مع توضع السرير الطبيعي.
- عامل امتصاص شعري للعينة في وضع مواز لتوضع السرير الطبيعي.

8- مقاومة التجمد (Frost resistance)

تحتوي معظم الأحجار على مسامات يستطيع الماء الدخول عبرها. وعند حلول الطقس البارد يتشكل الجليد على سطح الأحجار مما يزيد من حجم الماء فيه فيدفعه إلى الداخل حيث المسامات الفارغة وهكذا تزداد كمية المسامات التي تحتوي على الجليد ومع تزايد البرودة يضغط الماء المتجمد داخل المسامات على جدرانها مما قد يسبب انفلاقها أو تقصفها أو تفتتها.

توجد لكل نوع من الأحجار كمية معينة للماء والتي إذا زادت عنها كمية الماء داخل المسامات فإنها ستتسبب بحدوث عيوب في الحجر عند تجمد الماء.

لذلك يجب اختيار نوع الحجر بما يناسب المكان والموقع المستخدم له، حيث يتم اختيار الأحجار القاسية ذات النفوذية الضعيفة والمسامية القليلة في عناصر الواجهات الأكثر تعرضاً للعوامل الجوية.

9- العزل الحراري (Thermal Insulation)

ترتبط قدرة العزل الحراري للأحجار بوجود المسامات ونسبتها فيها. يمكن تعريف التوصيل الحراري لمادة (U) بأنه كمية الحرارة التي تعبر عينة من هذه المادة سماكتها (1m) في واحدة الزمن ولواحدة السطوح في نظام مناخي ثابت.

هناك علاقة بين التوصيل الحراري للمادة وكتلتها الحجمية الظاهرية، ولوحظ أنه كلما ضعفت الكتلة الحجمية الظاهرية للحجر كلما زادت قدرته على العزل.

10- العزل الصوتي (Sound Insulation)

يحدد عزل جدار ما للصوت بالرمز (R) واحدته الديسيبل (dB) ويقاس في المخبر، أو بالعزل الصوتي الصافي للجدار (D) واحدته الديسيبل مقاساً في الموقع (الديسيبل واحدة قياس الشدة الصوتية).

ويتعلق عزل الصوت بمواصفات الحجر (القساوة، الكتلة الحجمية) وبتواتر الصوت. تعطي الأحجار الطبيعية بسبب كتلتها الحجمية عزلاً صوتياً جيداً.

11- المرونة (Plasticity)

هي خاصية الأجسام التي لها القدرة على الرجوع إلى شكلها وأبعادها الأصلية بعد تشكيلها، أي: عدم بقاء الجسم على الشكل الذي تشكل به بعد زوال الحمل المؤثر ورجوعه إلى شكله الأصلي.

12- اللدونة (Elasticity)

هي خاصية توجد في كثير من المواد (ومنها في التربة أو الطين) وهي عند تعرضها إلى ضغوط خارجية لا تعود إلى حالتها الطبيعية عند زوال المؤثر الخارجي كما في اللدائن المعروفة حيث عندما نضغط عليها بأداة حادة سوف يؤثر فيها ولكن بعد زوال ذلك المؤثر لا تعود إلى حالتها الطبيعية.

13- مقاومة الضغط (Pressure resistance)

عندما تتعرض المواد الصلبة و بصفة خاصة الصخور لقوى خارجية قد يؤدى ذلك إلى تغير في شكلها الأصلي أو حجمها أو الاثنين معاً، و يقال في هذه الحالة حدث تشوه للمادة. لذلك يجب علينا دراسة أنواع القوى المؤثرة على المادة وأنواع التشوه التي تحدث لها وبالتالي دراسة المرونة.

14- الاجهاد (Stress)

يعرف الإجهاد بأنه القوة المؤثرة عمودياً على وحدة المساحات من الجسم. فإذا أثرت قوة F على مساحة A من الجسم فأن الإجهاد يعطى من العلاقة:

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad (3\text{-}8)$$

يختلف نوع الإجهاد باختلاف نوع القوة المؤثرة حيث أن القوى المؤثرة على الجسم يمكن تقسيمها إلى **قوة ضغط وقوة شد وقوة قص** وبالتالي يكون للإجهاد الناتج ثلاثة أنواع:

- **إجهاد الشد (Tensile stress)**

يحدث تغير في طول الجسم لأن القوة المؤثرة تعمل على طول الجسم وتكون بشكل قوتين متضادتين تشدان الجسم.

- **إجهاد الضغط (Compressive stress)**

يحدث انكماش للجسم، بسبب وجود قوتين متضادتين تضغطان الجسم.

- **إجهاد القص (Shear stress)**

هذا النوع من الإجهاد يؤدى إلى تغير شكل الجسم، مثل التأثير بقوة مماسية على جسم من المطاط على شكل مكعب مثبت من قاعدته.

15- التشوه (Deformation)

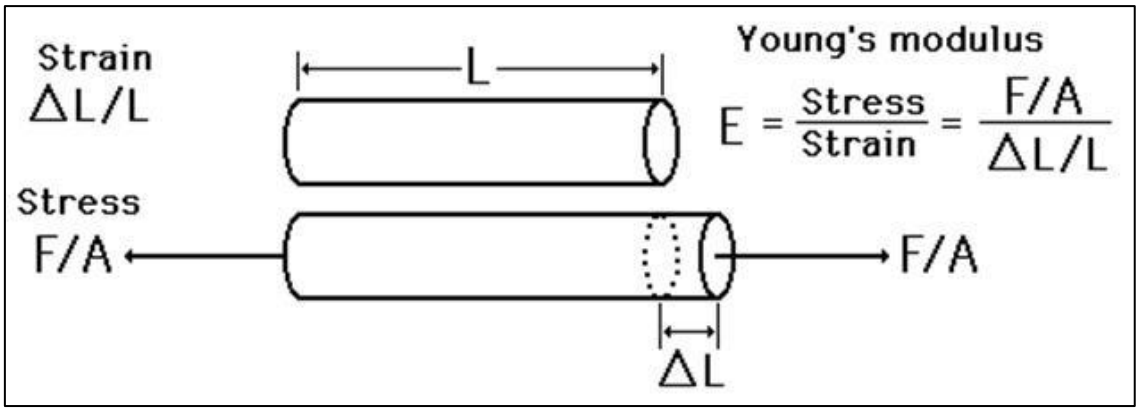
عندما تطبق القوة على الجسم فإنها ستؤثر عليه بإجهاد يسبب تغيراً في شكل الجسم، هذا التغير يسمى تشوهاً في الجسم. ويكون التشوه هو النسبة بين البعد الجديد للجسم بعد التشوه إلى البعد الأصلي للجسم. لذلك يكون التشوه ثلاث أنواع:

- **التشوه الطولي:** وهو مقدار التغير في طول الجسم إلى الطول الأصلي.
- **التشوه الحجمي:** وهو مقدار التغير في حجم الجسم إلى الحجم الأصلي.
- **التشوه القصي:** وهو مقدار التغير في شكل الجسم إلى الشكل الأصلي (دائماً عبارة عن زاوية).

وهو ليس له واحدة لأنه دائما نسبة بين كميتين من نفس النوع.

يرتبط التشوه الحاصل في الجسم بالإجهاد المطبق الذي سبب تشوهه وهذا يوضَّح من خلال منحني يربط الإجهاد بالتشوه ويسمى منحني المرونة.

لنأخذ مثلاً قضيب طوله (L)، مساحة مقطعه (A)، مثبت بشكل رأسي من أحد طرفيه ومعلق في طرفه الأخر ثقل ذو قوة شد (F) كما هو موضح بالشكل (3-1).



الشكل (3–1) شكل يوضح مدخلات علاقة عامل يونغ

نتيجة لتأثير هذه القوة سوف تحدث استطالة للقضيب بمقدار(ΔL). وبذلك يكون الإجهاد المؤثر هو (F/A) والتشوه الناتج هو (ΔL/L).

بتغيير قيمة القوة المؤثرة بشكل متزايد تدريجياً ستتغير قيمة الاستطالة أيضاً، وبرسم العلاقة بين القيم السابقة ينتج لدينا منحني هو منحني المرونة الموضح بالشكل (3–2).

نلاحظ وجود أربعة أجزاء على الشكل وهي كالتالي:

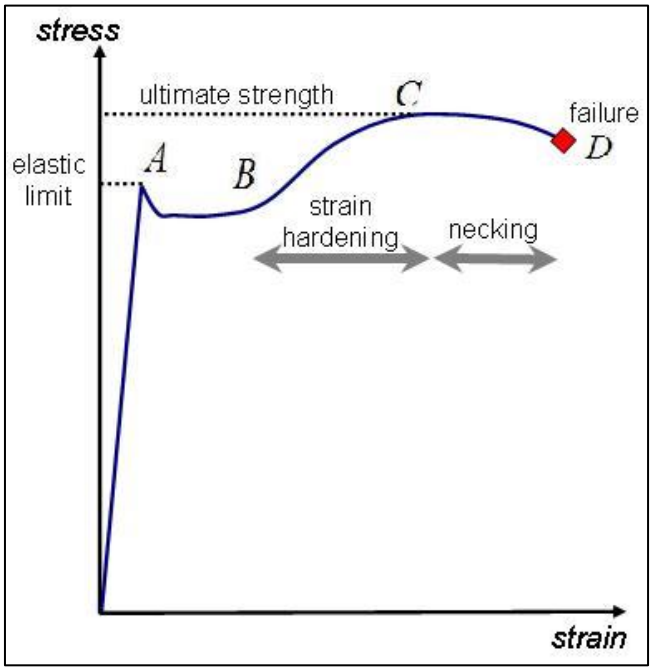
- الجزء الأول (OA): وهو منطقة المرونة إذ تكون العلاقة بين الإجهاد والتشوه طردية وعند إزالة القوة المؤثرة يعود الجسم إلى شكله الأصلي. نسمي النقطة (A) حد المرونة.
- الجزء الثاني (AB): يكتسب الجسم في هذا الجزء تشوهاً دائماً لا يزول عند زوال القوة المؤثرة.
- الجزء الثالث (BC): أية زيادة للإجهاد في هذا الجزء تقابلها زيادة في تشوه الجسم لكنها ليست خطية كما في الجزء الأول من المنحني، ويقابل النقطة (C) أكبر قيمة للإجهاد يستطيع الجسم أن يتحملها.
- الجزء الرابع (CD): يحدث بعد النقطة (C) زيادة تشوه الجسم دون أن يقابله زيادة في الإجهاد المطبق حتى يصل للنقطة (D) فيحدث انهيار الجسم.

- **قانون هوك (Hooke's Low)**

ينص قانون هوك على أن الإجهاد يتناسب طردياً مع التشوه فقط ضمن منطقة المرونة.

Stress = cons x Strain (*)

و يسمى ثابت التناسب بين الإجهاد والتشوه بثابت المرونة أو معامل المرونة و له نفس واحدة الإجهاد.



الشكل (3-2) منحني المرونة

ولهذا الثابت ثلاث أنواع حسب كيفية الإجهاد المؤثر وهي:

1- معامل المرونة الطولي/معامل يونغ (Young's modulus)

تعطى قيمته بالعلاقة:

$$E = \frac{Stress}{Strain} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \qquad (3\text{-}9)$$

حيث:

(E) معامل يونغ (N/m^2)

(F) القوة المطبقة (N)

(A) مساحة المقطع العرضي (m^2)

(L) الطول الأصلي للعنصر (m)

(ΔL) مقدار التشوه الحاصل (m)

2- معامل المرونة الحجمى (Bulk Modulus)

يعطى بالعلاقة

$$B = \frac{-dP}{dV/V} = -V\frac{dP}{dV}$$

حيث:

(B) معامل المرونة الحجمي (N/m^2)

(P) معامل المرونة الحجمي (N/m^2)

(V) مساحة المقطع العرضي (m^3)

ووجود الإشارة السالبة يدل على زيادة الحجم مع انخفاض الضغط المطبق.

3- معامل المرونة القصي (Shear Modulus)

وهو الأساسي في منحني الإجهاد-التشوه في حالة القص. يرتبط بمعامل يونغ ومعامل المرونة الحجمي بالعلاقات:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad (3\text{-}10)$$

& $$G = \frac{3(1-2\nu)}{(1+\nu)}K \qquad (3\text{-}11)$$

حيث:

(E) معامل يونغ (N/m^2)

(ν) معامل بواسون

(K) معامل المرونة الحجمي (N/m^2)

3-3- مواد الربط (الملاط) (MORTAR)

وهي كما من إسمها تستخدم مواد الربط لربط قطع البناء مع بعضها البعض وقد تكون الكتل حجرية أو آجرية أو اسمنتية أوغيرها. كما تساعد المواد الرابطة على زيادة متانة المنشأ ومقاومته للأحمال الخارجية وتشكل هذه المواد عازلاً لدخول الماء بين العناصر الحجرية.

يتكون الملاط أو المونة (Mortar) من مزيج رملي يُضاف له الإسمنت أو الكلس والمـــاء ليأخذ شكل عجينة والتي عند تعرضها للهواء تتصلب وتصبح متماسكة. يتم تشكيل الملاط بين هذه الكتل ويتصلب عند تعرضه للهواء لجعل منها كتلة واحد، كما يمكن أن يســتخدم الملاط لاحقاً كمادة ترميمية لإصلاح وملئ الفراغات الناجمة عن تآكل أو انحلال المــلاط القديم.

3-3-1- أنواع مواد الربط وصفاتها

توجد عدة أنواع للمونة وتصنف وفقاً للمواد المكونة لها كالتالي:

3-3-1-1- المونة الكلسية (Lime Mortar)

تتكون من مزيج الرمل والكلس والماء. وهي من أقدم أنواع المونة المســتخدمة للجــدران الحجرية لكنها تعتبر ضعيفة على الضغط مقارنة بمواد الربط الحديثة كالمونة الاسمنتية.

3-3-1-2- مونة القصرمل

تتكون من التراب الأحمر والكلس ونواتج حرق الأفران (الرماد) بنسب معينــة، وكانــت تستعمل في الجدران المبنية من الحجر الطبيعي أو من الآجر، وهي ذات متانــة ضــعيفة وقليلة الاستخدام.

3-3-1-3- المونة الترابية

تتكون من التراب والتبن والماء، وكانت تستعمل مع اللِّبن الترابي، وهي ذات متانة ضعيفة تتأثر بالرطوبة وبالعوامل المناخية.

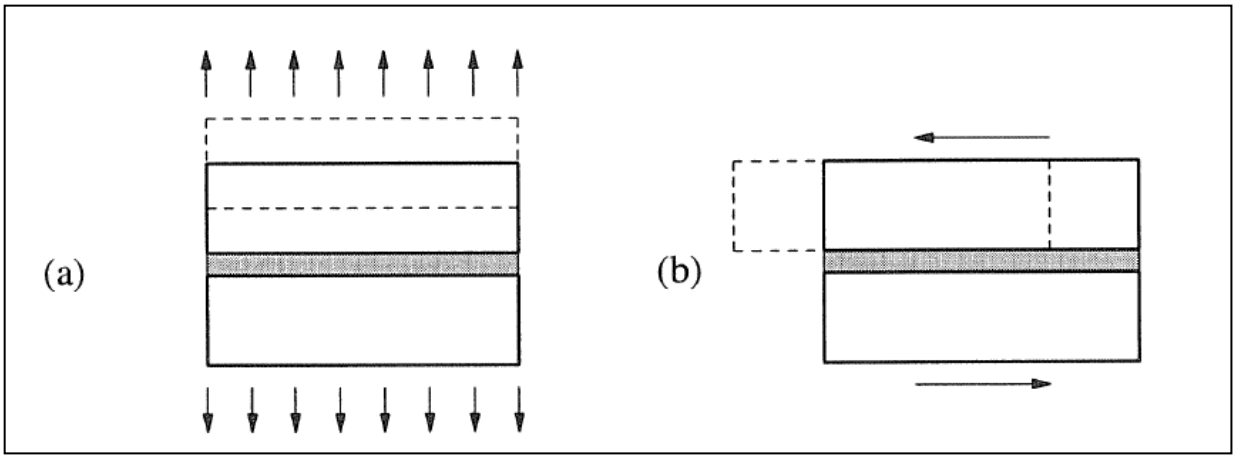
3-3-1-4- مونة الجص (Gypsum Mortar)

وهي عبارة عن مزيج من الجص (Gypsum) والماء، سريعة التصــلب وتســتخدم مــع الأحجار لبناء الأقواس. متانتها متوسطة لكنها سريعة التأثر بالرطوبة والماء.

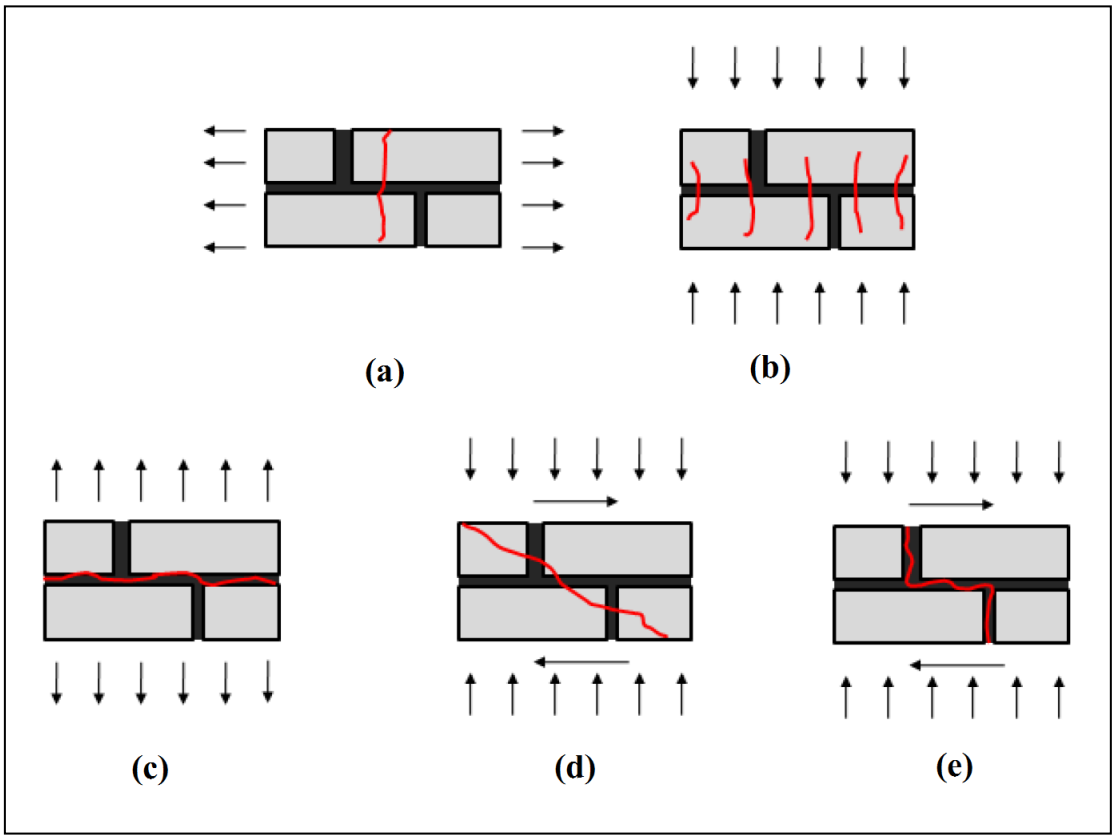
3-3-5- المونة الإسمنتية (Cement Mortar)

تتكون هذه المونة من الإسمنت والرمل والماء. وتستعمل المونة الإسمنتية فــي الجــدران الحاملة من الحجر الطبيعي أو الآجر أو البلوك الإسمنتي. وهي مادة رابطة حديثة ومتينــة تقاوم الرطوبة والعوامل المناخية بصورة جيدة. يبين الشكل (3-3) والشكل (3-4) عــدة

أشكال لأسباب انهيار المنشأ الحجري، فقد تكون بسبب ضعف وانهيار المادة الرابطة أو قد تكون بسبب تشقق المواد الحجرية.



الشكل (3-3) ميكانيزم انهيار الملاط: (a) انهيار الملاط بسبب الشد؛ (b) انزلاق الملاط. [24] (Lourenco, Paulo. 1995)



الشكل (3-4) ميكانيزم انهيار الحجر: (a) تشقق مباشر بسبب الشد؛ (b) تشققات طولية بسبب الضغط؛ (c) التشقق الملاط بسبب الشد؛ (d) التشقق المائل للحجر بسبب الشد؛ (e) التشقق المتدرج للحجر بسبب الشد. [17] (Ghiassi, Bahman.)

الفصل الرابع: الأضرار والعيوب والكشف عن أسبابها

4-1- مقدمة

تعتبر الجسور الحجرية القوسية منشآت هامة في سوريا إذ يوجد حوالي /1000/ جسر تقريباً وتشكل (60%) من مجموع جسور السكك الحديدية، لم تعد تبنى مثل هذه الجسور منذ (75) عام تقريباً. عمر الجسور الحجرية القوسية يتراوح بين (75) و(170) عام.

وافق أعضاء الاتحاد الدولي للسكك الحديدية (UIC: L'Union internationale des chemins de fer) على ضرورة المحافظة على هذه المنشآت بدلا من استبدالها. كما اتفق الجميع على أن هذه الجسور تشكل جزءاً من ارث السكك الحديدية. (Garcia, Rafael Ozaeta.2006) [16].

تعتبر عملية المعاينة الخطوة الأولى الفعالة ضمن عملية إعادة التأهيل، حيث يقود التشخيص الخاطئ إلى أخطاء أخرى مثل إجراء ترميمات غير ضرورية. كما أن عدم فهم سلوك المواد الحجرية قد يسبب أحياناً صعوبة في تشخيص أضرار الأقواس. ويمكن لهذا الافتقار بالفهم أن يؤدي إلى المبالغة في تقدير خطر الانهيار عندما يكون الخطر لا يكاد يذكر والعكس صحيح.

العيوب التي تمت ملاحظتها من إدارات السكك الحديدية المختلفة ضمن مجموعة العمل كانت متشابهة؛ ولكن وجد اختلاف في التشخيص بعد معاينة السلوك الإنشائي وعمليات الترميم الواجب إجراؤها. هذه الاختلافات تقود إلى اقتراح دليل يمكن بوساطته التزود بمعايير مشتركة لتعريف العيوب، وصف تطورها (تتضمن دراسة أكثر الأسباب الشائعة) وتأثيراتها على سلوك الجسور. حيث يمكن شرح الأضرار التي يتم الكشف عنها بواسطة المعاينة البصرية للجسور الحجرية القوسية.

تسعى هذه العملية لجمع الأضرار لتكون أداة تساعد في عملية معاينة الجسور الحجرية القوسية. الأهداف الأساسية من ذلك هي:

- تعريف الأضرار مع توصيات متطلبات العمل خلال وبعد الفحص للتمكن من تحديد نوع و سبب الضرر.
- تحديد الأسباب الأكثر شيوعاً لتدهور العيوب.
- تحديد الآليات الأكثر شيوعاً لتدهور العيوب.
- تأثيرات الضرر على السلوك الإنشائي للجسر.

للقيام بعملية المعاينة من الضروري معرفة ما يحصل للجسور إنشائياً ولماذا تحصل هذه العيوب. إن فهم هذه الظاهرة أو عدم فهمها ضروري للتمكن من الحصول على قرار وللبدء بأعمال الترميم، أو للقيام بكشوفات إضافية ودراسات أكثر.

4-2- تعريف الأضرار والعيوب الموجودة في الجسور الحجرية (Garcia, Rafael (Ozaeta.2006) [16]

تم تطوير وثيقة إيضاحية تحسِّن من فهم أسباب حدوث الأضرار ومعالجة التلف الناتج عنها، وبالتالي للتزود بالمعلومات التي تساعد في معرفة الأضرار المختلفة التي قد توجد وتظهر أثناء عملية المعاينة.

تتكرر الأضرار في مختلف أنواع الجسور والمواد، والذي يتغير فقط هو تواترها و تطورها حسب تغير المواد أو منطقة الجسر (كذلك شروط الطقس لها تأثيرها).

الجزء الأول من البحث (النص) يصف المنهج العام والذي وفقا له تعطى كافة البيانات والمعلومات.

من الممكن تعريف أكثر الأضرار شيوعاً وذلك من خلال تحليل البيانات التي يتم الحصول عليها، وصفها ومَنشئها في الجسور الحجرية القوسية، شرح أسبابها ومعالجة التلف. يمكن استخدم نظام تصنيفي لمستوى الأضرار لتسهيل تحليلها ومعالجتها.

- **المستوى الأول** يعتمد على موقع الضرر:
  - ضرر القسم السفلي من المنشأ (الأساس)
  - ضرر القسم العلوي من المنشأ (المنشأ)
- **المستوى الثاني** للضرر ينقسم إلى ضرر الأساس وضرر المنشأ ويوضَّح كالتالي:

المستوى الثاني لضرر الأساس هو:

- الضرر العائد لتدهور الأساس.

- ضرر بسبب سوء التفاعل بين التربة والمنشأ.

المستوى الثاني لضرر المنشأ هو:

- الأضرار المتأثرة بالمقاومة الإنشائية.
- الأضرار المتأثرة بالمتانة.

حُدِّد هذا التقسيم لأن معالجته تختلف باختلاف عدة عوامل (العوامل المؤثرة، خصائص المواد،...الخ).

على الرغم من الأهمية الإنشائية للأضرار المتأثرة بمقاومة أو قوة القوس، تم إدخال تأثير الأضرار المتأثرة بالمتانة.

- **المستوى الثالث** لضرر قسم المنشأ العلوي وأضرار المتانة كما يلي:

- أسباب ومعالجة التلف بمختلف التأثيرات، المواد، شرح ميكانيكيات الضرر.
- الأضرار التي يمكن أن تظهر: وصف الأضرار، كيفية تعريفها جميعاً مع التوصيات اللازم العمل بها خلال وبعد عملية المعاينة، والأضرار العادية المترافقة مع كل نوع من الضرر موجودة ضمن هذا البحث.

تم اختيار هذا التقسيم لأنه أسهل للدراسة ويختلف من ناحية معالجة الأضرار.

أولاً، يتم وصف التأثيرات و خصائص المواد بهدف فهم العوامل الأساسية التي تؤثر على قوس ما خلال فترة استثماره.هذه المعلومات يجب أن تساعد على فهم آلية التدهور.

ثانياً، توصف آليات التدهور من مصدر الضرر مع النتائج وكذلك، في كل حالة، مختلف الآثار المحتملة سيمكن وصفها.

أخيراً، كل من الأضرار مشروح بالتفصيل، مزودة بأكثر أسباب الأضرار شيوعاً. وقد يكون هناك أكثر من سبب، وهذه المعلومات يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند المعاينة.

يختلف كل جسر عن غيره وكذلك تختلف شروطه المحيطية، لكن توجد معايير أساسية توجه المهندس لمعرفة الطريقة الأفضل للبدء بإجراء المعاينة والاختبارات الأولية قبل استكمال جمع المعلومات الضرورية للكشف الصحيح لمعرفة أسباب الضرر.

4-2-1- الأضرار التي يتعرض لها القسم السفلي من المنشأ (الأساس)

من الضروري تحديد الأضرار التي يتعرض لها القسم السفلي للمنشأ (الأساسات) حتى تتمكن من فهم أسبابها ومعرفة كيفية تصنيفها. يمكن تحليل الأضرار الناجمة عن تدهور العنصر وعدم الاستقرار عن طريق دراسة التأثيرات في الأساسات والمواد ومعرفة الأضرار الناتجة عن الحت.

يمكن تلخيص **التأثيرات** على الأساسات كما يلي:

1-التأثير الناتج عن المياه الجارية: يسبب ضغطاً ديناميكياً على الأساسات، الاضطرابات التي تسبب حت قاع النهر، التآكل وزعزعة الأساس، الارتشاح، الخ. وعلاوة على ذلك، فإن الاختلاف في ظروف ضفة النهر، موقع النهر وكذلك زاوية ميل النهر بالنسبة للأساسات يسبب الكثير من المشاكل للجسور.

2-التأثير البيولوجي: يسبب تعفن العناصر الخشبية.

3-الشروط المناخية (الرطوبة): تسبب صدأ العناصر المعدنية، التفاعلات القلوية، تأثير السلفات، الخ.

4-تأثير الإنسان: إما بشكل طوعي (الحرب أو التدمير)، أو بشكل إجباري، وذلك نتيجة للجهل أو عدم المعرفة، والتي أدت إلى الحفر استخراج الرمال بدون ضوابط، وكذلك لبناء حواجز بوجود شك بدقة المعايير. الأضرار الناجمة عن الحوادث المتعلقة بالأساسات نادرة.

و**المواد** الأكثر استعمالاً في الأساسات هي:

1- الأخشاب: تستخدم للأوتاد ورؤوس الأوتاد والتي تكون معرضة للتعفن وأن تصبح هدف لحفار الخشب.

فُرضت في الماضي بعض القيود على عملية البناء ومنها قيود على طول الوتد وقطره. كما أن ضعف المعرفة الجيوتكنيكية آنذاك أدت إلى تطبيق قواعد تجريبية عند البناء لم تكن الأكثر ملائمة على الدوام. هذا ما سبب تساؤلات عن قدرة الأوتاد الخشبية المنفَّذة وتفاعلها مع التربة المحيطة والتي لم تزل غير معروفة حتى الآن. لكن طريقة تفاعل الأوتاد مع المنشأ أسهل للإدراك إذ ينتقل الحمل من المنشأ عبر رأس الوتد إلى جسمه ثم للأرض.

2- الحجر: يُعتبر سلوكه أكثر وضوحاً عند البناء، ولكن عند النظر في عناصر الأساس لا يزال يمثل حالة عدم اليقين. وتتمثل بعض التساؤلات بطبيعة الروابط المشتركة بين القطع الحجرية، خصائص وحالة الملاط، الخصائص الميكانيكية للحجر والتي في حال معرفتها يجب أن يتم استخدامها بحذر.

أخيراً، تُحدَّد **الأضرار** التي تحدث في عناصر الأساسات، بشكل عام، كالتالي:

- الحت الذي يؤدي إلى تسارع التآكل ويؤثر على مقاومة الأساس والوتد.
- التآكل الموضعي لمواد الأساس.
- كشط وتعفن الخشب الذي يسبب دوران الأساس، يرافقه ضرر الأوتاد، الدعائم وجسم القوس.
- صدأ العناصر المعدنية.
- تشققات غير منتظمة على عناصر الأساس الإسمنتي بسبب التفاعلات القلوية وتأثير الكبريت.
- عدم الثبات (التقويض) الذي قد يسبب دوران الأوتاد.

كل ما سبق قد يؤدي لمشاكل هامة في المنشأ لأنها قد تظهر فجأة دون إنذار مسبق.

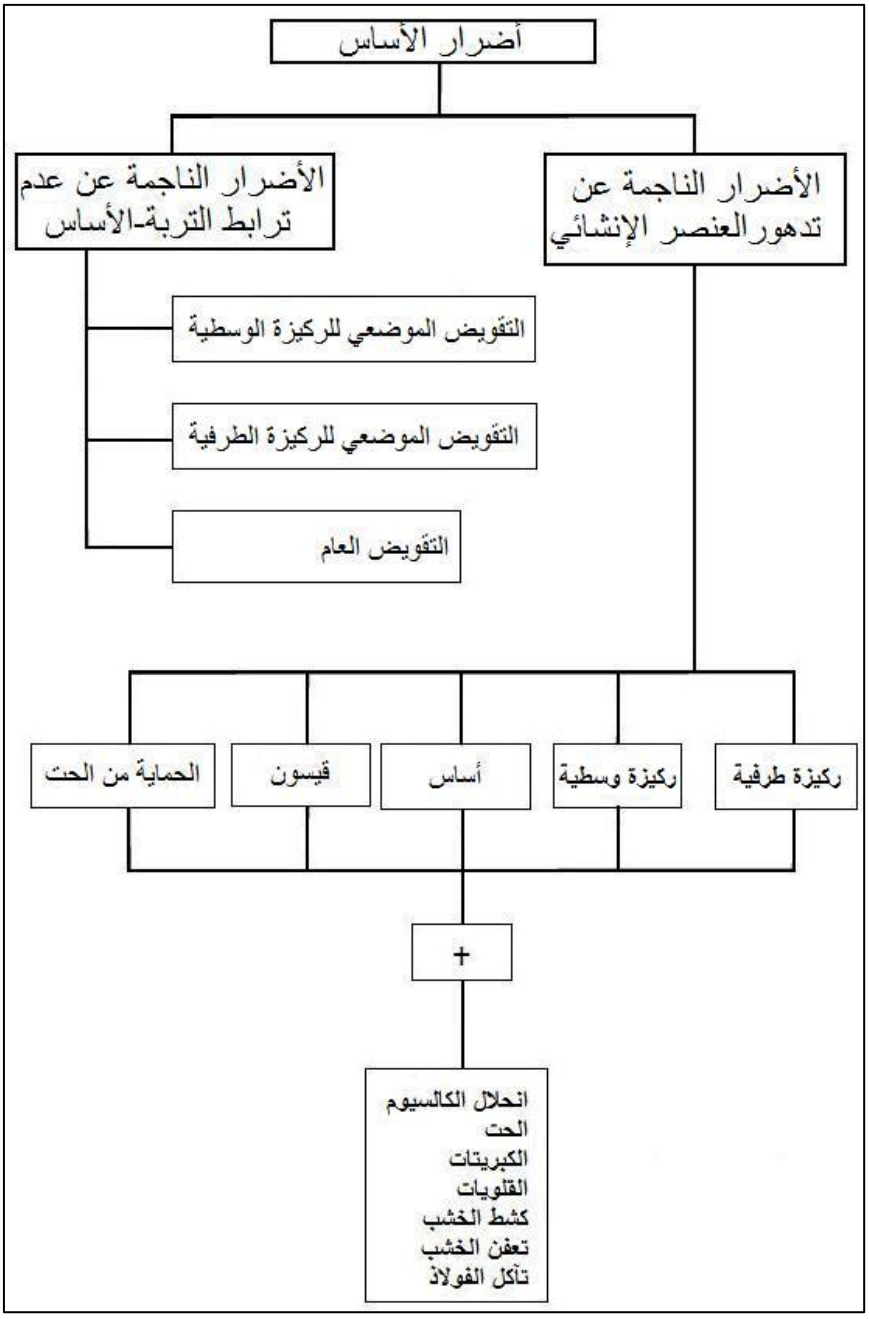
المشكلة الأساسية لضرر الأساسات –ليس فقط في الجسور– هي صعوبة معاينتها. فإذا تمت المعاينة في الصيف، قد يكون من الأسهل تحديد مشاكل تدهور العنصر، الركيزة الوسطية، الأساس، القسم العلوي من الركيزة الطرفية، وحتى المشاكل المرتبطة بتدهور التربة–الأساس.

وكذلك في حالة الجسور التي تمر فوق الأنهار تكون بشكل عام ذات عمق تأسيس كبير وغالباً تحت منسوب الماء أو مخفية بسبب الترسبات، ومن الواضح أن المعاينة تحت الماء حتى بالاستعانة بفريق مختص صعبة التنفيذ.

للحصول على معلومات إنشائية كافية عن أساسات الجسور وتفاصيل مجرى النهر تحت الجسر، محيطه والمقاطع العرضية لابد من ضرورة وجود فريق استطلاع أو معدات خاصة بتقنيات المسح والتي من الصعب والمكلف توفرها واستخدامها.

ولذلك، في العمل الميداني، يجب كمرحلة أولى محاولة القيام بالكشف عن الأساس معرفة مدى استقراره قدر الإمكان ومراقبة وتحليل الأعراض التي تظهر في النهاية على البنية

الفوقية كنتيجة للدوران، أو في حال وجود حركة تفاضلية للأساس. إضافة إلى ذلك، يمكن أن تكون هناك أساسات غير مستقرة ولكن لا تبدو أية علامات لعدم الاستقرار سواء كانت في قاع النهر أو في المنشأ العلوي. هذا يمكن أن يؤدي إلى حالات غير متوقعة من عـــدم الاستقرار، حركات كبيرة وحتى انهيار كلي أو جزئي. قد يمكن اكتشاف هذه الحالات فقط بواسطة أجهزة الاستماع الخاصة التي تقع خارج نطاق هذه الدراسة.



الشكل (4-1) الأضرار المحتمل حدوثها في أساسات الجسور الحجرية القوسية

إن تدهور أساس المنشأ ليس معروفاً بشكل جيد ولكنه كثيراً ما يحدث. يظهر الشكل (4-2) أضرار أساس الجسر.

إن الأضرار المباشرة التي يعاني منها الأساس تعود لسببين: تردي مواد الأساس أو عدم استقرار الأساس. الأول بسبب الحت، تحلل الكلس أو الاسمنت، التغيرات الكيميائية بسبب المياه، كشط الركائز الخشبية، تعفن ركائز الخشب، صدأ العناصر المعدنية. السبب الثاني ناتج عن حت الأساسات (تقويض)، الحت من سرير النهر، وتغيرات في المجرى أو المقطع العرضي أو التغييرات في المقطع طولي للنهر. في الفقرات التالية تظهر هذه القضايا بتفصيل أكبر.

الشكل (4-2) أساس حجري متدهور

4-2-1-1- الأضرار الناتجة عن تدهور العنصر

يقصد بالعنصر ليس فقط الأساس أو قبعة الوتد، كذلك العناصر المسؤولة عن الحماية من الحت والتي ستزول قبل العناصر الأخرى. في العديد من المنشآت يصعب التمييز بين أساس المنشأ والركيزة، حيث أن وجود ماء النهر والعناصر الجديدة الناجمة عن التدخلات البشرية وغيرها يمكن أن تغطي عليها مما يجعل من المستحيل غالباً التمييز

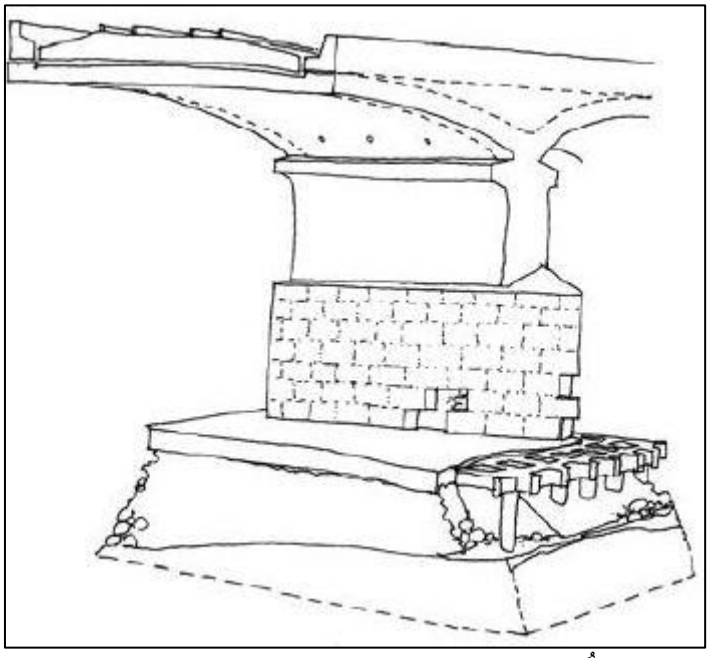
بينها. تم تصنيف الأضرار المذكورة أعلاه للحصول على دليل لمعرفة الأضرار. إضافة لذلك، بعض الأضرار ليست بالتحديد لعناصر الأساس، بل يمكن أن تظهر في أماكن أخرى من المنشأ (جسم القوس، الركائز، الجزء فوق القوس، الخ).

أ- فقدان حماية العناصر

وهي واحدة من أكثر الأضرار شيوعاً حيث تعاني الأساسات من الأضرار الناجمة عن التأثير المباشر للمياه، وضياع وتدهور عناصر الحماية. تُظهر التجربة أن وضع كاسر الأمواج يساعد على حماية المساند، تغير تدفق المياه مع الزمن لا يتعلق بحجم كتل الاستناد، ومع ذلك فإن الكتلة كافية لمقاومة تدفق المياه.

ب- التآكل الموضعي لعناصر الأساس: يمكن أن يحدث هذا الضرر بسبب:

- فقدان الحصى والحجر الرملي بفعل حت ردميات مياه النهر، فقدان عناصر الأساسات والعوارض، جنباً إلى جنب مع تآكل وتدهور المونة وعمليات الإصلاح. تحدث هذه الأضرار نتيجة زيادة سرعة المياه (بسبب تضيق قاع النهر) مما يؤثر على متانة العنصر، كما أن تعرض الردميات للعناصر الخشبية يسبب تآكلها. يبين الشكل (3-3) الحالة التي يكون فيها الأساس مكشوف بعد تعرضه للتأثير المذكور أعلاه.



الشكل (3-4) تكشُّف الأساس نتيجة فقدان عناصر الحماية وتآكل المواد

- تحلل كربونات الكالسيوم: يؤدي تحلل الكلس إلى تفكك الملاط وعناصر الكلس البيتونية، وتحدث عادة لأساسات الجسور الحجرية. تميل مياه النهر إلى إذابة كربونات الكالسيوم، دون أن تؤثر على الملاط والبيتون، والنتيجة هي تشكيل تجاويف أو حتى في بعض الأحيان التفكيك الكامل للأساس. إن سرعة عملية التحلل تعتمد على تسرب المياه من الخرسانة والملاط والتي هي أيضا تعتمد على المواد المُضافة والتنفيذ النهائي.

على الرغم من أن ذلك يؤثر على سلامة العناصر الإنشائية لكنه لا يشكل خطرا على الاستقرار العام للمنشأ، ومع ذلك يجب اتخاذ الإجراءات اللازمة لإصلاح الأضرار.

ت- التشققات غير المنتظمة في عناصر الأساس (الركائز الوسطية، الردميات والركائز الطرفية)

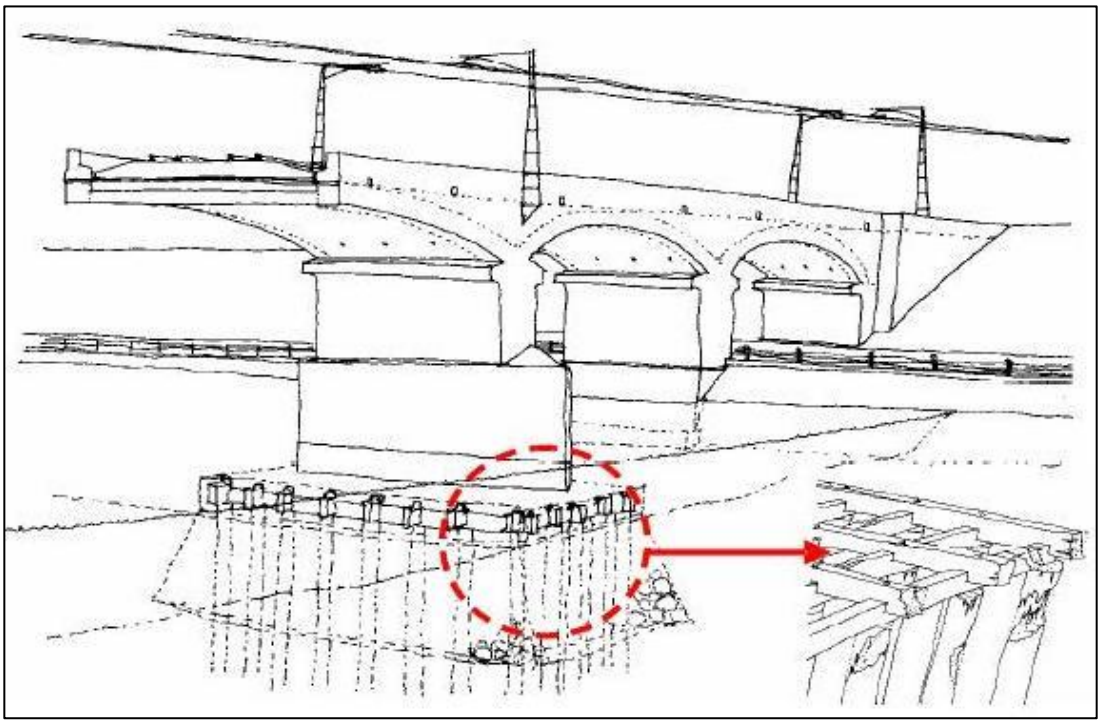
يوجد نوعان من العمليات الرئيسية التي تسبب هذا الضرر والذي يؤثر على الخصائص الكيميائية للعناصر الخرسانية للأساس: تأثير الكبريتات على الخرسانة ومواد الربط وتفاعل السيليكات القلوية مع الرمل.

يكون التدهور بظهور تشققات غير منتظمة يعقبه تحلل كامل.

وعلى الرغم من أن هذه الأضرار خطيرة إلا أنها لا تمثل خطراً وشيكاً على المنشأ في المدى القريب.

ث- كشط وتعفن الركائز الخشبية

كشط الركائز الخشبية بفعل التأثير الميكانيكي الذي يحدث عندما تكون رؤوس الأوتاد مكشوفة. العناصر الأضعف والأنحف هي المتضرر الأول إذ قد يتدمر رأس الوتد بشكل كامل بفعل الكشط. تحدث هذه الظاهرة بسبب فقدان حماية العناصر كذلك مادة الأساس (رأس الوتد والدعامات). كما في الشكل (4-4).



الشكل (4-4) كشط وتعفن الركائز الخشبية

إذا كان مصدر التأثير بيولوجي وليس ميكانيكي، فالنتيجة تكون تآكل أو سحق الخشب وفقدانه. أظهرت التجارب، بشكل عام، أن عمل الركائز الخشبية في الأنهار يمكن أن يدوم لفترة طويلة، فإذا كانت الركائز مغمورة بالماء دائماً، تكون محمية من الفطريات التي لا تستطيع النمو بدون الهواء، وبالتالي لا يحدث التعفن. أما في الوسط البحري يمكن أن يتعرض الخشب لأنواع مختلفة من الرخويات مما يسبب سوءاً في المقاومة. بينما يكون الخشب في مناطق المد والجزر حساس خاص نظراً لفترات المد والجزر عندما يكون مكشوف ومغمور. هذا مشابه لما يحدث للأوتاد في مجرى النهر عند تغير منسوب المياه التي تسبب حت رؤوس الأوتاد.

ج-تآكل العناصر المعدنية المستخدمة في الأساسات

خلال النصف الثاني من القرن التاسع عشر والنصف الأول من القرن العشرين كانت المواد المعدنية أكثر استخداماً في بناء الأساسات ضمن الأنهار، خاصة إذا كان النهر عميق. في حالات أخرى، تم تثبيت الركائز باستخدام عناصر معدنية تضاعف الحماية ضد دورة المياه (التدعيم بالصفائح الوتدية)؛ مع الوقت فإن المواد المترابطة سوف تتعرض للتآكل خاصة في المناطق المعرَّضة لتغيرات مناخية (مياه-هواء). تكمن أهمية ذلك أن

المواد المحمية والمذكورة سابقاً معرضة للحت بفعل الماء والهواء. وكما ذكرنا سابقاً، من المحتمل ظهور ضعف في الحماية قبل ملاحظة أي أعراض للأضرار.

الشكل (4–5) تآكل العناصر المعدنية المستخدمة في التدعيم

استخدم اليونانيون القدماء في النصف الثاني من القرن التاسع عشر والنصف الأول من القرن العشرين الربط التقليدي بين الكتل الحجرية (الحجارة المنحوتة) باستخدام مواد مثبتة بالأسلاك. تمت المحاولة فيما بعد إيجاد طرائق تختلف عن استخدام الملاط لجعل ترابط الكتل الحجرية آمناً فكانت النتيجة جيدة في حينها ولكن مع الوقت ثبت أن المواد المعدنية (الحديد أو البرونز) سببت أضراراً على الحجر كالتشققات بسبب الصدأ وتشكل الكبريتات.

لا يصنف هذا الضرر بشكل عام من الأضرار المهمة، على الرغم من أنه يجب الأخذ بعين الاعتبار أن تطور هذا النوع من الأضرار قد يؤدي إلى أضرار أكثر خطورة. وبالتالي لا يجب تأجيل المعاينة الخاصة بتقدير حجم الضرر الموجود.

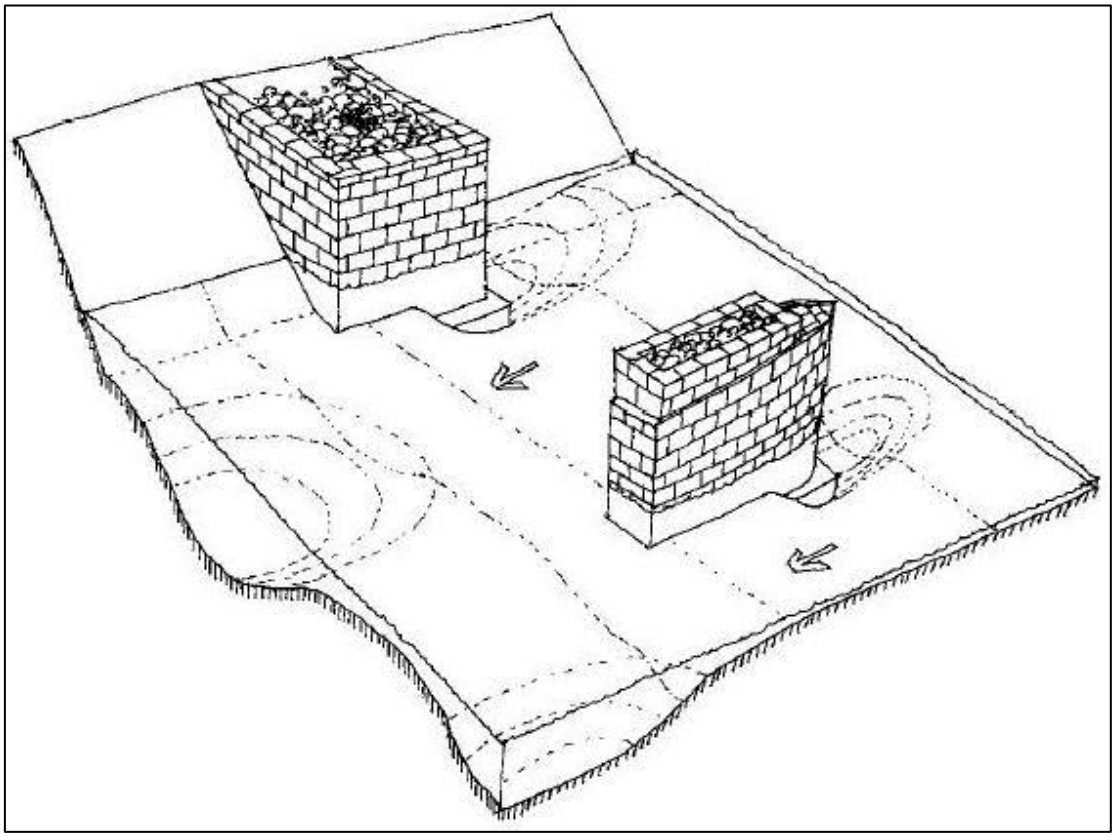
4–2–1–2– الأضرار الناتجة عن فقدان استقرار الأساس

كما ذكرنا سابقاً، إن حتّ الأساسات يُعتبر من أكثر الأسباب شيوعاً التي تؤدي لفشل الجسور الحجرية الممتدة عبر الأنهار. يسبب الحتّ حالات عدم استقرار خطيرة نتيجة تشكل الفجوات وضعف ثبات (ضعضعة) الركائز.

تُلخَّص التأثيرات الحاصلة ضمن ثلاث مجموعات: تغيُّر في المقطع العرضي، تغيرات في المقطع الطولي والضعضعة بسبب الفيضانات.

الشكل (4-6) أمثلة عن تأثر سرير النهر

يمكن أن يحدث التغير في المقطع العرضي لنهر متعرج وتتشكل التجمعات الرملية و الجزر عندما يتم البحث عن وضع توازن بعد الفيضان أو بعد تدخل الإنسان في قاع النهر. يقود هذا لبدء ترسُّب الطمي أو بدء تآكل ضفة النهر بجوار المنشأ، وتصبح الركائز الطرفية أقرب إلى مجرى النهر مما كانت عليه في التصميم الأصلي، فضلاً عن أن انتشار المياه يصيب الركائز الوسطية والطرفية الموجودة في النهر.



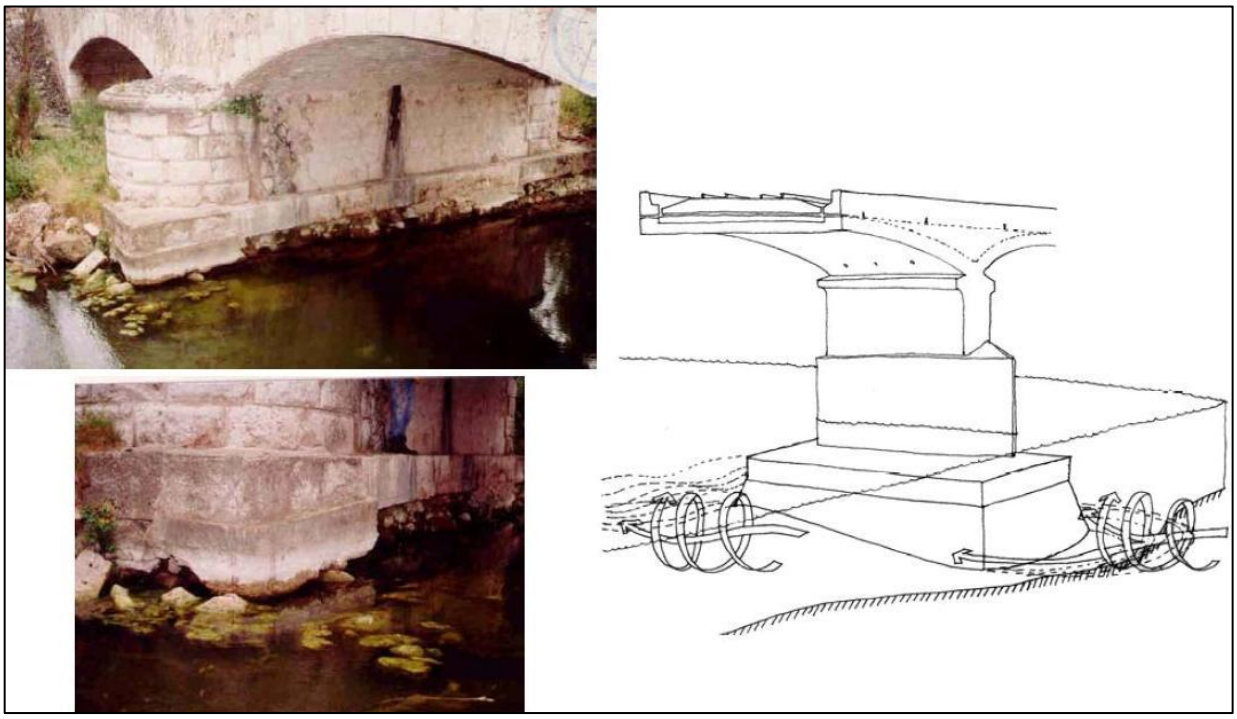
الشكل (4-7) الحت العام والموضعي في سرير النهر

عندما تكون هذه الترسبات غير كافية، ينخفض سرير النهر مسبباً وضع توازني جديد يتناسب مع حجم المواد الصلبة المنقولة عبر النهر.

هذه التغيرات في قاع النهر قد تسبب عدم استقرار الركائز الطرفية المؤسسة على منسوب قريب من منسوب المياه.

إذا كانت أمواج النهر عالية، يحدث الحت بسبب قوة المياه، وذلك نتيجة لزيادة سرعة النهر الحالية التي قد تسبب أيضاً زعزعة استقرار قاع النهر؛ الشكل (4–7). هذه الظاهرة الطبيعية قد تُضعِف من استقرار الأساس إذا كان النهر بحالة فيضان، وبما أن المواد المتوضِّعة تكون عادة خفيفة فإن المعاينة التالية قد تعطي نتائج خاطئة وتفترِض وجود قاعدة ثابتة دون أي فقدان لدعم الأساس.

هذا النوع من الأضرار يصنف كضرر خطير جداً، لما له من عواقب سيئة ولصعوبة الكشف عنه. وفقاً لذلك عند دراسة جسر يعبر نهر يوجد بقربه ظواهر حت يجب القيام بدراسة أكثر تفصيلاً عن الأساسات للكشف عن أي احتمال لعدم استقراره.



الشكل (4–8) تأثير الحت الموضعي على الركيزة الوسطية

يكمن ضعف الركائز الطرفية والوسطية أساساً في تآكل الجزء السفلي من قاع النهر نتيجة لتشكل الدوامات الأفقية التي تتكون حول هذه العناصر. إن مواد قاع النهر انتُزِعَت

من مكانها بتأثير مركبات التدفق الشاقولية، ثم رُفِعَت ونُقِلَت بعيداً عن الأساس. وبالتالي تتكون فجوة مخروطية الشكل عند أعمق نقطة للركيزة (upstream of the pier)؛ الشكلين (4–8) و(4–9).

يمكن أن يسبب تضيق المجرى المائي الذي يمر بين الركائز الطرفية والوسطية تآكل قاع النهر تحت القوس وتشكل التجاويف. تتشكل هذه الظاهرة بسبب الزيادة الموضعية للسرعة التي تنتج عن تضيق تدفق مياه النهر. في حالات أخرى، يمكن لانخفاض القدرة على التصريف أن تسبب، في أوقات الفيضان، مرور المياه خلف الركائز الطرفية. هذه ظاهرة خطيرة جدا بالنسبة لاستقرار المنشأ، كذلك الردميات خلف الدعامة تسبب ضغطاً أفقياً على القوس يؤدي إلى اختلال توازنه ومن ثم انهيار الجسر.

الشكل (4–9) تأثير الحت الموضعي على الركيزة الطرفية

كذلك، يمكن أن يزداد تأثير حتّ المياه بوجود إعاقة جزئية عند ضفة النهر بسبب وجود كتل تطفو فوق الماء أو تراكم الثلوج على المنشأ.

تجدر الملاحظة إلى أن الركائز الخشبية قد لا تؤسس دائماً على طبقة أساس صخرية إذ يصل أكبر طول لركيزة خشبية إلى عشرة أمتار، وهذا الطول قد لا يكون كافياً في بعض الحالات للوصول إلى طبقة التأسيس لتأمين التدعيم المناسب. إضافة لذلك يتم توزيع الأحمال عبر شبكة خشبية مجهزة لذلك وتوضع ببساطة فوق رؤوس الأوتاد. وبالتالي ترتكز مجموعة الأوتاد على التربة لتؤمن الاستقرار الأفقي.

يمكن أن يحدث الحتّ بالقرب من جدران المنشآت المجاورة، ويتم إنشاء هذه الجدران عادة لتأمين الحماية والاستقرار ضد حركة الأتربة ضمن النهر ولحماية حاجز الأمواج حول الدعامات والركائز، الخ.

على الرغم من أن العمل الطبيعي للمياه هو المسؤول عن معظم مشاكل الأساس إلا أنه يوجد أسباب أخرى للتدهور مثل تدخل الإنسان لتعديل التصميم الهندسي للمنشأ أو المناطق المحيطة به، سوء الصيانة، سوء التصميم، تنفيذ الإصلاحات وأعمال الحفر.

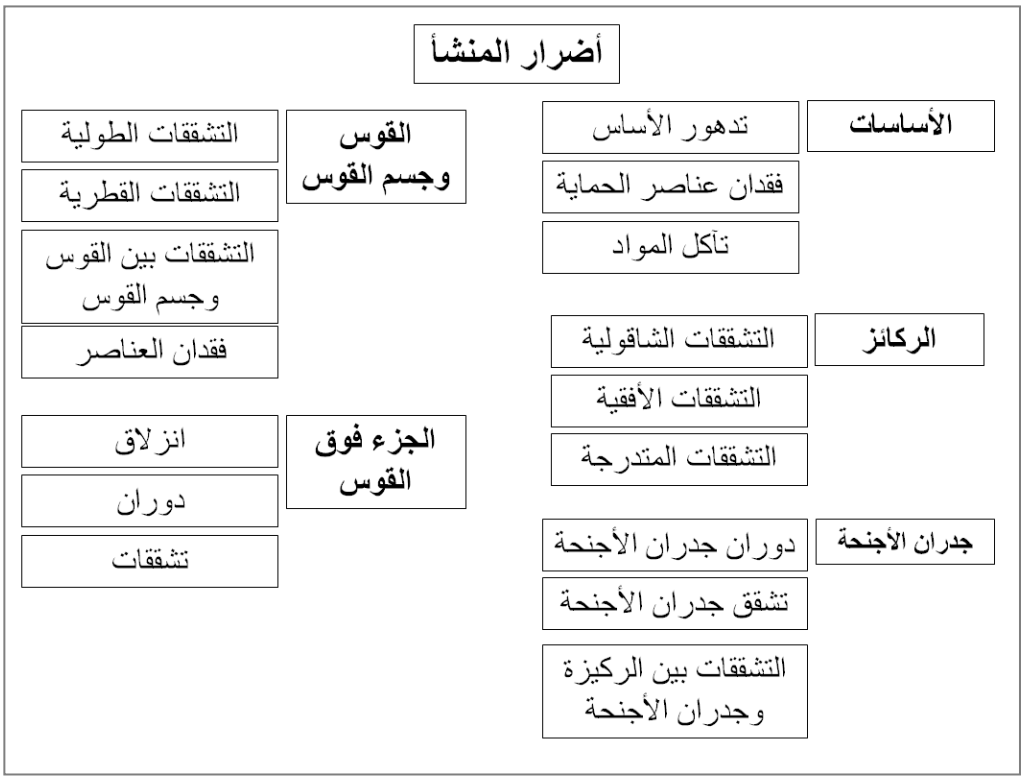
4-2-2- الأضرار التي يتعرض لها القسم العلوي من المنشأ

هناك مجموعة من الوثائق والمنشورات تظهر أمثلة عن الأضرار التي قد تؤثر على الجسور الحجرية للسكك الحديدية ولكن في معظم الحالات تكون معالجة الأضرار وصفية. في هذا البحث تمت محاولة تحليل وتصنيف الأضرار وفقاً لأصلها ومدى تأثر المنشأ بها. وكما ذكرنا تصنف أضرار القسم العلوي من المنشأ وفقاً لتأثيرها على قدرة التحمل والمتانة والمشاكل التي غالباً ما تقلل من مقاومة عناصر المنشأ الأساسية. تُعرَض أضرار القسم العلوي من المنشأ كالتالي: الأضرار التي تؤثر على قدرة التحمل و الأضرار التي تؤثر على المتانة.

4-2-2-1- الأضرار الناتجة عن سوء أداء المقاومة

توجد منهجيات مختلفة يمكن اتباعها لتوضيح الأضرار على الجسور الحجرية والناتجة عن سوء أداء المقاومة والتأثير على قدرة التحمل. يوضح الشكل (4-10) لمحة عامة عن الأضرار. على سبيل المثال، اختلاف منسوب تأسيس الأوتاد قد يسبب ضرر للأوتاد وكذلك جسم القوس، الجزء فوق القوس والـ (cutwaters) ، الخ.

وبالتالي نستنتج أنه عند وجود أضرار في جسم القوس توجد إمكانية أن تحدث أضرار في عناصر أخرى والذي يجب أخذه بعين الاعتبار.



الشكل (4-10) الأضرار الأكثر شيوعاً في المنشأ

تعتبر المعلومات المتوفرة عن الجسر وكذلك سلوك المواد والمنشأ جزءاً مهماً لدراسة أضرار الجسور، إذ تساعد في معرفة الإجراءات والعمليات التي تؤثر على السلوك الإنشائي للجسر والتعرف على أضرار العناصر الإنشائية.

4-2-2-2- التأثيرات الخارجية

أ- <u>تأثيرات الجاذبية</u>

يرتبط هذا التأثير بوزن المنشأ (أوتاد، ركائز، جسم القوس، الجزء فوق القوس، الشرفات، حواجز الجسر) ويتعلق بتوضع الأحمال الميتة (الحصويات، الطريق، الإصلاحات، الردميات، الخ). لتقدير قيمة الأحمال من المعتاد البدء بالمعلومات المتوفرة عن الأبعاد والأوزان المختلفة للمواد.

في بعض الحالات، إذا وُجدَت مشاكل في التصريف أو في الجزء فوق القوس، فإنه من الضروري الأخذ بعين الاعتبار ضغط المياه المُخزّنة بين السطح الخارجي للقوس والردميات. تؤثر جاذبية الأحمال الميتة، بشكل عام، تأثيراً جيداً على السلوك العام للجسر،

خاصة بالنسبة للجسور ذات الفتحات القصيرة والمتوسطة، لأنها تساعد على التأكد من أن الضغط متركز في مركز جسم القوس وتساعد في ثبات الجسر.

ب- <u>الجاذبية الإضافية (الناجمة عن وزن دائم غير متناظر على الجسر)</u>

من الأفضل التحقق من حمولة القطارات التصميمية والتي قد تكون غير موجودة في الكودات. كذلك التحقق من حمولة المواصلات العادية لإمكانية التعرف على مشاكل الخدمة والتعب. ويمكن استخدام الأحمال الحية الفعلية الموجودة في الكودات.

إن العديد من الأضرار الإنشائية الحاصلة في جسم القوس تعود لمكان توضُّع السكة في المقطع العرضي للجسر ويختلف وفقاً لمعيارين، الأول متعلق بعدد السكك المارة على الجسر، إذ يتم تصميم وبناء عدة جسور ذات عرض يكفي لسكة مزدوجة (مع أنه في بعض الأحيان تصمم لسكة واحدة) هذا المسار يتوضع بشكل غير متناظر على الجسر لكنه لا يمنع من وضع سكة ثانية في المستقبل؛ الشكل (4-11)؛ المعيار الآخر الذي يجب أخذه بعين الاعتبار هو نوع العوارض المعدنية المستخدمة، لأنها قد تؤثر تأثيراً كبيراً على توزع الحمولات.

يؤثر هذا التحميل غير المتناظر بالإضافة إلى الاستخدام المفرط أضراراً على المنشأ خاصة في جسم القوس بالقرب من التاج. في الجسور غير المنتظمة تتفاقم هذه الآثار، خاصة إذا كانت الروابط بين الحجر غير مناسبة لهذا النوع من البناء.

ترتكز المعلومات السابقة على التوزع الطولي والعرضي للأحمال الميتة والحية على الردميات وجزء جسم القوس المنحني.

يمكن أن تسبب أعمال الحفر زيادة في الأحمال الشاقولية والأفقية وأيضاً على الجزء فوق القوس التي تؤدي إلى انفصال جسم القوس والجزء الذي يعلوه.

في الجسور العريضة بما يكفي لمسار مزدوج يمكن أن تسبب المحاور الأفقية ضغطاً أفقياً على الجزء فوق القوس وكذلك قوى شد محورية على جسم القوس.

الشكل (4-11) مثال عن عدم تناظر المسار في المقطع العرضي للجسر

ت- <u>التأثيرات الأفقية الناتجة عن الفرملة (الكبح) وقوة النبذ المركزي</u>

التأثيرات الأفقية الناتجة عن الفرملة تؤثر على المنشأ الأساسي. تظهر التجربة أنه في معظم الحالات، تنتج عادة مشاكل الركائز بسبب التقويض وفقدان المواد.

أما بالنسبة للتأثيرات العرضية (قوة النبذ المركزي)، تجدر الإشارة إلى أنه لا يوجد كثير من الجسور الحجرية المنحنية في شبكات السكك الحديدية ولكن هناك استثناءات مثل الجسور الكبيرة كما بالشكل (4-11). هذه العطالة قد تزيد القوى الأفقية المؤثرة على الجزء فوق القوس للسطح الخارجي للمنحني وتُنقِص القوى الأفقية المؤثرة على الجزء فوق القوس الداخلي.

ث- <u>تأثيرات الرياح</u>

لا تسبب الرياح عادةً أضرار تؤثر بشكل مباشر على المنشأ. لكنها قد تؤثر على المتانة (سيرد شرحها لاحقاً).

ج- التأثيرات الحرارية والريولوجية (علم الجريان Rheology)

التأثيرات الحرارية على جسر قوسي يكاد لا يذكر بالمقارنة مع تأثيرات الحمولة الحية. أولاً، يملك هذا النوع من المنشآت سلوكاً ميكانيكياً لا خطي وبالتالي هش جداً، وهذا بسبب التأثير المشترك للتغيرات في درجة الحرارة والتأثير الريولوجي إذ يختفي بمجرد تغيُّر مرونة المنشأ المترافقة مع حالة التوازن الناتجة عن تطور المفاصل.

ثانياً، يمكن للعدد الكبير من فواصل التمدد الدقيقة الموجودة في المفاصل الملاطية أن تستوعب حركات التمدد والتقلص الناتجة عن تأثير الحرارة والتأثيرات الريولوجية.

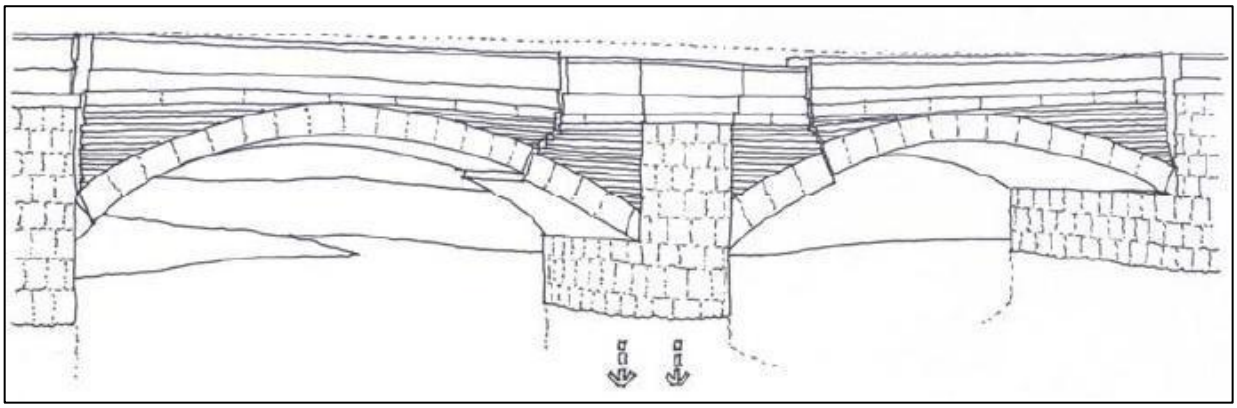
عند القيام بالإصلاحات الحالية، مثل (السطح الداخلي لجسم القوس الإسمنتي) يجب أخذ الاختلافات بين سلوك الانكماش للحجر والإسمنت بعين الاعتبار.

التشوهات الموجودة الناجمة عن التأثيرات الحرارية والريولوجية في الجسور التي شيدت على أرض مستوية يمكن أن تسبب تشققات وأضرار أخرى.

ح- الحركات الإجبارية

تظهر الحركات الإجبارية كنتيجة لحركات الركائز الوسطية والطرفية مثل التقويض. وهذا التأثير مسؤول عن معظم أضرار المنشأ.

تسبب تسوية الأرض غير المنتظمة تحت الركائز الوسطية والطرفية تحرك الأساس بشكل غير منتظم مما يمكن أن يؤدي إلى عدم انتظام القوى الداخلية على الركائز وجسم القوس وبالتالي يسبب تشققات في العنصر الحجري. وبناءً على موقع ومقدار الحركة التفاضلية للأساس وعلى نوع الحجر المستخدم في البناء ستحدث التشققات بشكل أفقي أو مائل؛ الشكل (12-4).

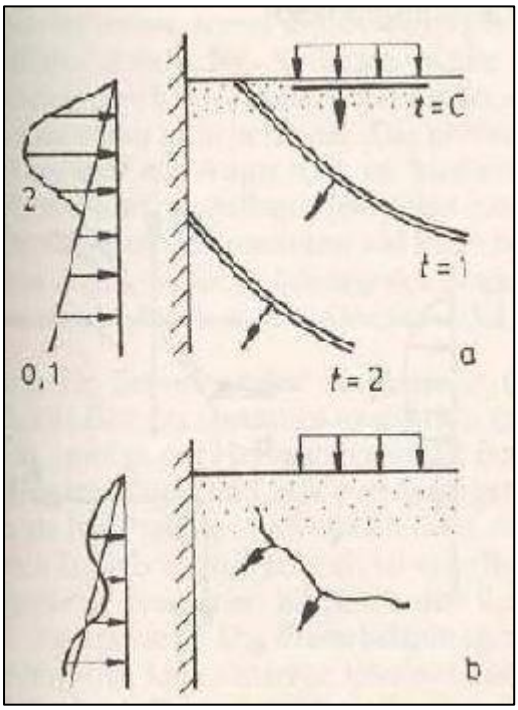


الشكل (4-12) هبوط الركيزة الوسطية والأضرار الناتجة عنها

خ- <u>التأثيرات الديناميكية المتحركة</u>

إن التأثيرات الديناميكية، والتي يمكن ملاحظتها عند مرور القطار فوق القوس، يصعب جداً تحديدها بسبب وجود عدد كبير من المتغيرات. يلعب الأثر الـــديناميكي دوراً هامـــاً إذ يسبب القطار عند مروره قوة دينامية على الحصويات وتنتقل مسببة أمواج ضغط الشـــكل (13-4) والتي تؤثر على الردميات إذ قد تكون مفيدة وتضغط الردميات وتسبب ضغط تربة أقل، وبالعكس قد تكون سلبية وتسبب زيادة سرعة الانتشار أي زيادة التأثير الديناميكي على جسم القوس والجزء فوق القوس. إضافة لذلك، عند نفوذ المياه للردميات يتضخم تأثير الفعل الديناميكي والضغط الخلالي.

وكما هو مبين في الشكل (13-4)، إن التأثير الديناميكي على جسم القوس والجـــزء فـــوق القوس يزيد قيمة الضغط الموضعي عدة مرات عن القيمة الستاتيكية على الرغم من كـــون التأثير لفترة قصيرة جداً. تعتمد قيمة الضغط، في جسم القوس، على ارتفاع التاج، الجـــزء فوق القوس، وعلى المسافة بين الطريق والجزء فوق القوس الخارجي.



الشكل (4-13) تأثير موجة الضغط على السطح الخارجي لكل من جسم القوس والجزء أعلاه. (a) تأثير الحمل الثابت، (b) تأثير الحمل المتكرر.

كما هو الحال مع مواد البناء الأخرى، يظهر على الحجر المعرض لتحميل دوري علامات قصور. وحتى لو لم تكن اختلافات الإجهادات كبيرة بشكل ملحوظ، فإن عدد الدورات المتكررة تؤدي لتراكم يجعل هذه المنشآت حساسة تجاه هذه المشكلة، والذي يتعلق أيضاً بمتانة المنشأ. لذلك، ليست مصادفة أن العديد من الجسور التي تكون عليها حركة المرور كثيفة يحدث فيها مثل هذا الضرر، بغض النظر عن شكل القوس، جسم القوس سطحي أو عميق، أو كان الجسر بفتحة قوسية واحدة أو عدة فتحات.

4-2-3- الأضرار التي تتعرض لها المواد

4-2-3-1- المواد

لفهم أضرار المنشأ الممكن مشاهدتها في الجسور يجب فهم سلوك الحجر كمادة إنشائية من وجهة نظر ميكانيكية.

تتمتع المنشآت الحجرية بعدة خصائص تجعلها مميزة عن غيرها من المنشآت والتي تؤثر بشكل مباشر أو غير مباشر على سلوكها الميكانيكي. تم تحديد هذه الخصائص في العديد من الدراسات، حيث تم وصف مجموعة واسعة من أنواع الحجر، وخصائصها غير المتجانسة والمتباينة. فيما يلي نبين منهجية تساعد في الحصول على قيم المتغيرات اللازمة لتوصيف الخصائص الميكانيكية للحجر المستخدم في تشييد مختلف العناصر الإنشائية للجسر.

معيار القصور τ- σ

يعود قصور العناصر الحجرية للتفاعل بين الإجهادات المماسية والناظمية. وهذا ما يحدث للعناصر المعدنية المحدد معيار خضوعها وفق صيغ (Treska) أو (Von Misses). لكن في الحجر، يؤثر وجود قوى القص في المقطع ليس فقط على توزيع وقيمة الضغط المماسي ولكن أيضاً على توزيع وقيمة الضغط الناظمي وهذه الميزة خاصة بالحجر. وعلاوة على ذلك، تعرف العلاقة بين (τ–σ) بثلاثة أنماط من القصور؛ الشكل (14-4).

النمط I: قصور بسبب احتكاك المفاصل.

النمط II: قصور بسبب حركة الحجر.

النمط III: قصور بسبب ضغط الحجر.

في الوقت الحاضر، هناك اتفاق عام بين الباحثين حول تعريف هذه الأنماط من القصور وأسبابها والنقطة الوحيدة التي ربما لم يكن هناك اتفاق عليها هي حقل إجهادات الحجر المستخدم في الصيغة النهائية للمعايير.

الجدول (4-1) أنماط القصور العائدة للعلاقة (τ–σ)

الإجهادات الرئيسية	شرط القصور	عوامل المواد والعوامل الهندسية	نمط القصور
القص	انزلاق العقد	μ, c الداخلية	أفقي دون كسر الحجر أو الآجر
القص المحوري	قصور بسبب إجهادات الشد في الحجر	ξ, f_{tb} للقطع	قصور مفاصل الملاط والحجر
التحنيب	قصور الضغط للحجر بسبب الشد	(f) للحجر (f_b, f_{tb}, α)	تقسم الحجارة، تشققات عمودية على عقد الملاط

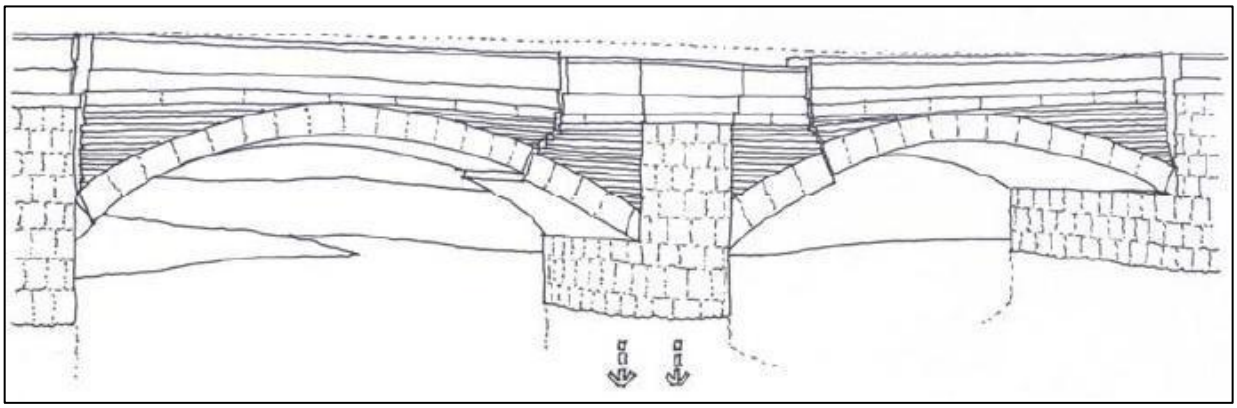
4-2-3-2- وصف الظاهرة الناتجة عن أداء مقاومة سيء

أ- <u>مشاكل المنشأ العلوي الناتجة عن مشاكل الأساس</u>

كما ذكر سابقاً، ترتبط غالبية أضرار المنشأ بمشاكل أو قصور الأساسات. لذلك، يعتبر السبب الأول لانهيار هذه المنشآت. في الفقرة (4-2-1) "أضرار الأساسات"تم وصف الأسباب المختلفة لحركة عناصر الأساس. يمكن من خلال الدراسة النسبية والمطلقة لحركة الركائز الوسطية والطرفية تفسير عدد كبير من أنواع الأضرار، وفقا لما يلي:

- الهبوط التفاضلي الطولي بين نقاط استناد جسم القوس (ركيزة وسطية أو طرفية).

كما في الشكل (4-12) تأثير الهبوط الطولي لمسند مرتبط بآخر ولا يوجد دوران، تسبب قصور ناتج عن انزلاق شرائح حلقات القوس الحجري أو قصور القص (المعيار I أو II) في منطقة مناسبة للحركات الموضعية للتاج أو لجسم القوس إذا كان القوس منشأ من حجر وعدة حلقات. قد يترافق هذا النوع من القصور مع تشكل المفاصل في جسم القوس أو في الدعامة. وهذا قد يقود إلى زيادة كبيرة في إجهادات الضغط داخل الحجر. هذا القصور خطر جداً إذ قد يؤدي لتخفيض قوة المنشأ.

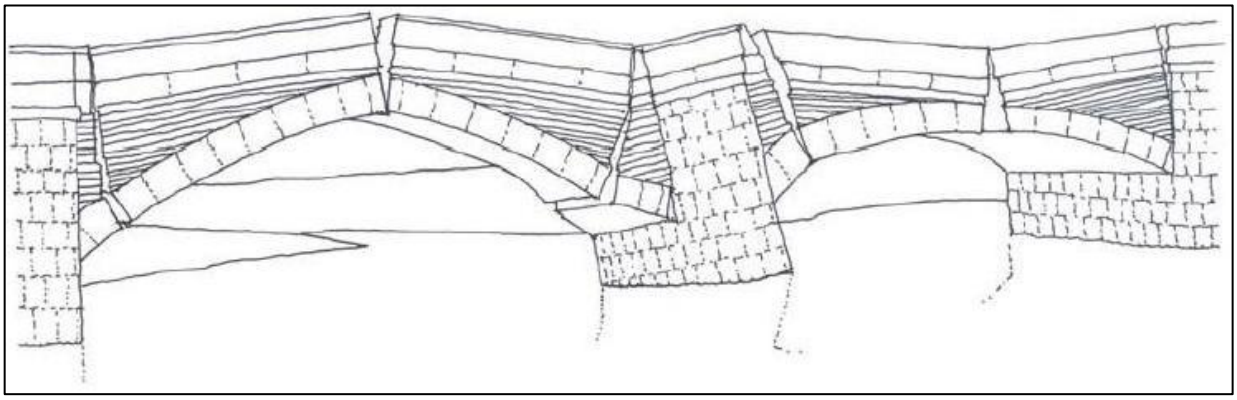


الشكل (4-12) هبوط الركيزة الوسطية والأضرار الناتجة عنها

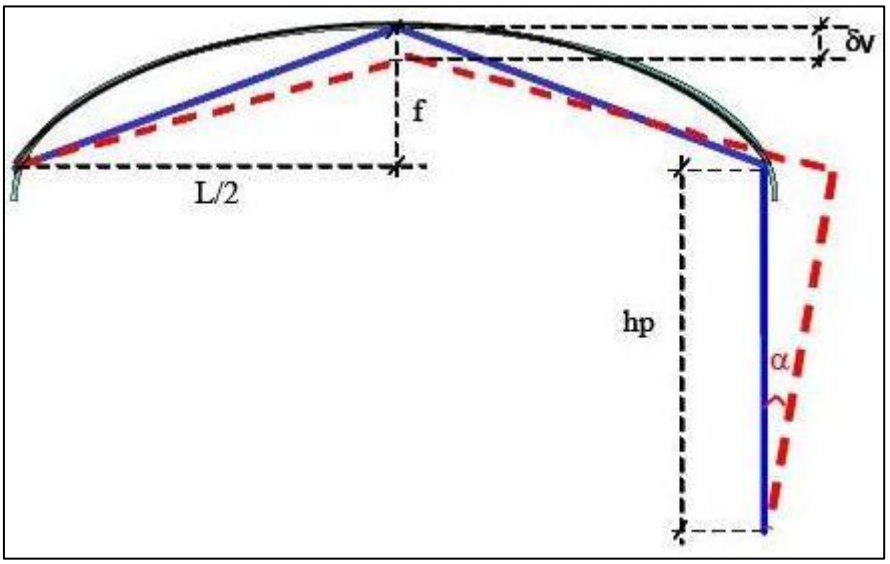
- الدوران الطولي للركيزة الوسطية أو الطرفية

في الجسور متعددة الفتحات، قد يكون للدوران الطولي للركائز تأثيراً مدمِّراً. قد يحدث هذا الدوران عندما تتجاوز القوى المؤثرة على جسم القوس عزم الانقلاب في الركيزة أو عندما يحدث دوران الأساس.

لذلك، فإن الجسور التي تملك عامل أمان مقبول انهارت بسبب دوران قاعدة الركيزة الناتج عن الحت. يجب الملاحظة أن الدوران الصغير للركيزة يدل على هبوط كبير عند التاج في الفتحة إذا كان التشقق في جسم القوس مفتوح وأن الارتفاع كبير عند التاج في الفتحة إذا كان التشقق في جسم القوس مغلق. هذه التغييرات في هندسة جسم القوس يؤدي إلى تشكيل ثلاثة مفاصل في جسم القوس ومفصل على الركيزة.



الشكل (4-14) الأضرار الناتجة عن دوران قاعدة الركيزة الوسطية (آلية الانهيار)



الشكل (4-15) حركة جسم القوس والركيزة باعتبارهم عناصر صلبة مستقلة.

تم إجراء دراسة تحليلية وأمثلة ومنها استخلصت عدة نتائج هي:

- من أجل كل قيمة لطول الفتحة (L)، ارتفاع الفتحة (f)، ارتفاع الركيزة (hp)، توجد قيمة للدوران (α) التي تسبب آلية ما.
- كلما زاد طول الفتحة، قلت قيمة الزاوية اللازمة لتشكيل ميكانيكية في المنشأ بفرض أن جميع العوامل الأخرى متساوية.
- كلما صغر قطر القوس قلت قيمة الزاوية اللازمة لتشكيل ميكانيكية في المنشأ.
- كلما زاد ارتفاع الركيزة قلت قيمة الزاوية اللازمة لتشكيل ميكانيكية في المنشأ.
- كمثال بسيط، قوس بفتحة قيمتها (10م)، مع النسبة (f/L=1/6) وارتفاع الركيزة (hp=5.00 m)، قيمة الزاوية اللازمة لتشكيل ميكانيكية هي فقط (6°).

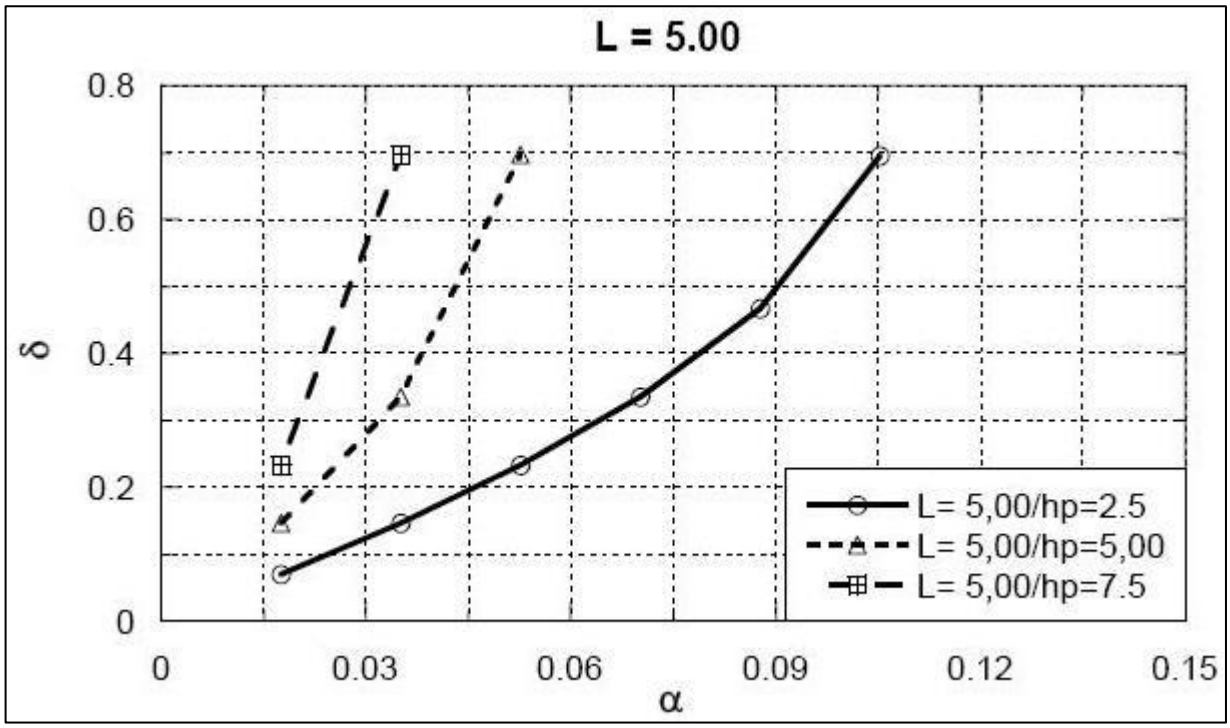
تظهر في الشكل (4-17) العلاقة بين زاوية الدوران (مقاسة بالراديان) والحركة الشاقولية للتاج (L=5.00m, f/L=1/6). حيث تمثل النقطة الأخيرة من كل خط نقطة انهيار المنشأ.

إن وجود زاوية دوران صغيرة جداً كافية لتشكل ميكانيكية ما وبالتالي عند حدوث أي دوران يجب التحقق من وضع الأساس ويدل حدوث تشققات عرضية لجسم القوسين المتجاورين على تشكل المفاصل (كما في الشكل (4-14)). وبالعكس، ينتج عن هذا الدوران الصغير حركة تاج الفتحات المتجاورة، والتي يجب أن يتمكن الشخص الذي يقوم بالمعاينة من ملاحظتها بوضوح.

إن تناوب الحركات نحو الأعلى والأسفل تسبب الانتقال الكلي أو الجزئـــي للحجـــر أو الآجر الموجود عند التاج. تكمن خطورة هذا القصور بكونه يقلل من استطاعة المنشأ.

إضافة لذلك، عند تشكل المفاصل، تتركز في حجر القوس إجهادات ضغط كبيرة والتي نادراً ما قد تسبب تضرر الحجر قبل تشكل الآلية. هذا المستوى من الضـــغط يســـبب انقسام السطح الداخلي لمناطق التاج والكتف حيث يكون الضغط مرتفع.

توجد أنواع أخرى من الأضرار المرتبطة بنوع القصور والتي تُعتبر خطيـــرة بشـــكل جزئي على الجسور ذات الركائز المتوضعة داخل سرير النهر. تؤثر هـــذه الأضـــرار على متانة المنشأ بسبب تدفق المياه عبر التشققات العرضية (المفاصل) والتـــي تقـــود، على سبيل المثال، إلى تشكل البقع والقشرة.

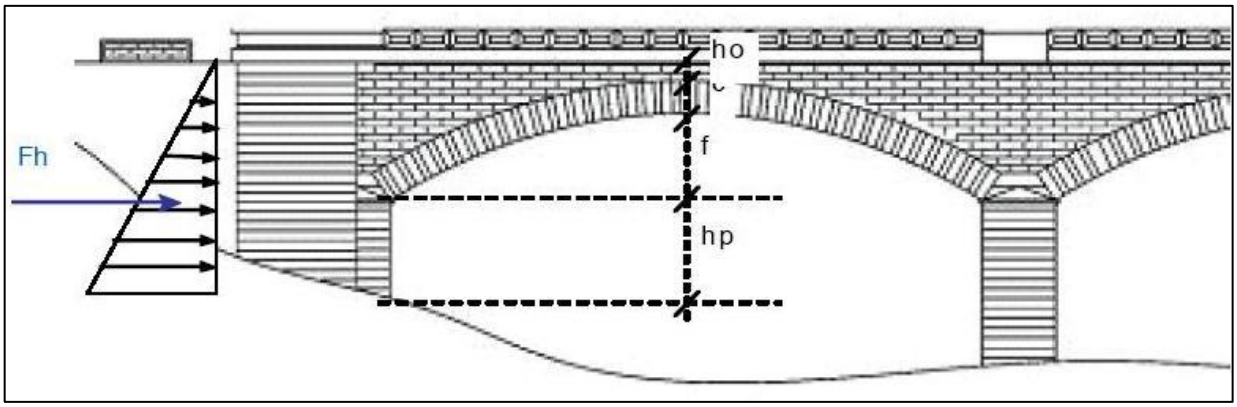


الشكل (4-16) العلاقة بين الحركة الشاقولية للتاج وزاوية دوران قاعدة الركيزة α من أجل (L=5.00m, f/L=1/6). تحدث ميكانيكية الانهيار لانتقال شاقولي قيمته (0.7m).

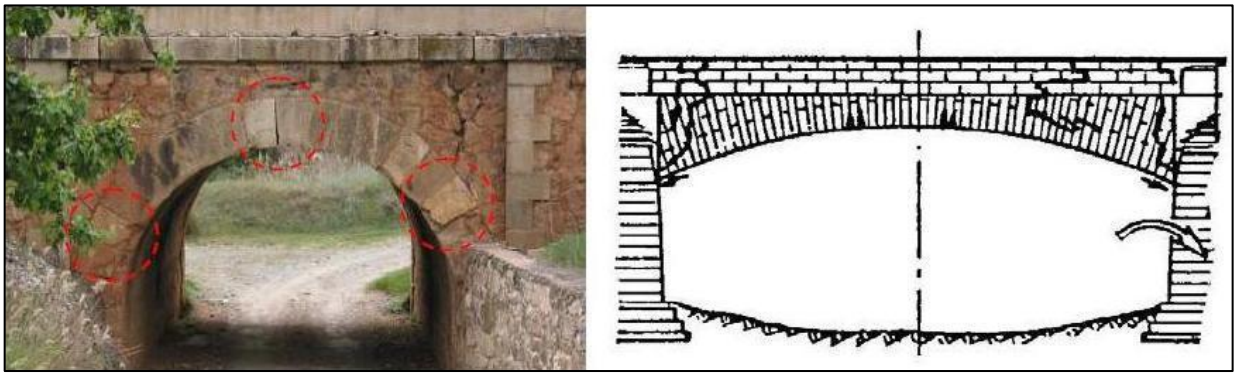
سبب آخر يساعد على حدوث ميكانيكية الانهيار هو عدم قدرة الركائز الطرفية علـــى مقاومة القوى الأفقية المنقولة عبر المنشأ وخاصة في الجسور الحجرية القوسية متعددة الفتحات. إذا لم يكن من الممكن دوران الركيزة الطرفية سيؤدي ذلك لتطوُّر الميكانيكية.

تنتقل القوى الأفقية غير المتوازنة عبر جسم القوس إلى الركائز الطرفية التي تُقاوِم الضغط السلبي الناتج عن التربة المحجوزة خلف الركيزة الطرفية. وبالتالي، يجب القيام بعملية المعاينة للتحقق من توضع الردم خلف الركيزة الطرفية بشكل جيد بحيث يكون قادراً على توفير الضغط السلبي اللازم، أو من الممكن أن تتآكل بسبب الفيضانات، وفي جميع الأحوال قد تتعرض الركيزة الطرفية للدوران.

يُظهِر الشكل (4-17) الضغط الأعظمي الناتج عن التربة خلف الركيزة الطرفية مع الأخذ بعين الاعتبار نقطة تطبيق قوة المحصلة. إذا لم تستطع الركيزة الطرفية القيام برد فعل أفقي، سوف تدور وتتشكل ثلاثة مفاصل في القوس.



الشكل (4-17) الضغط الأعظمي على الركيزة الطرفية ومحصلتها



الشكل (4-18) الضرر الحاصل في جسم القوس والأجزاء المحيطة به نتيجة دوران الركيزة الطرفية باتجاه الردم وتشكل ثلاثة مفاصل

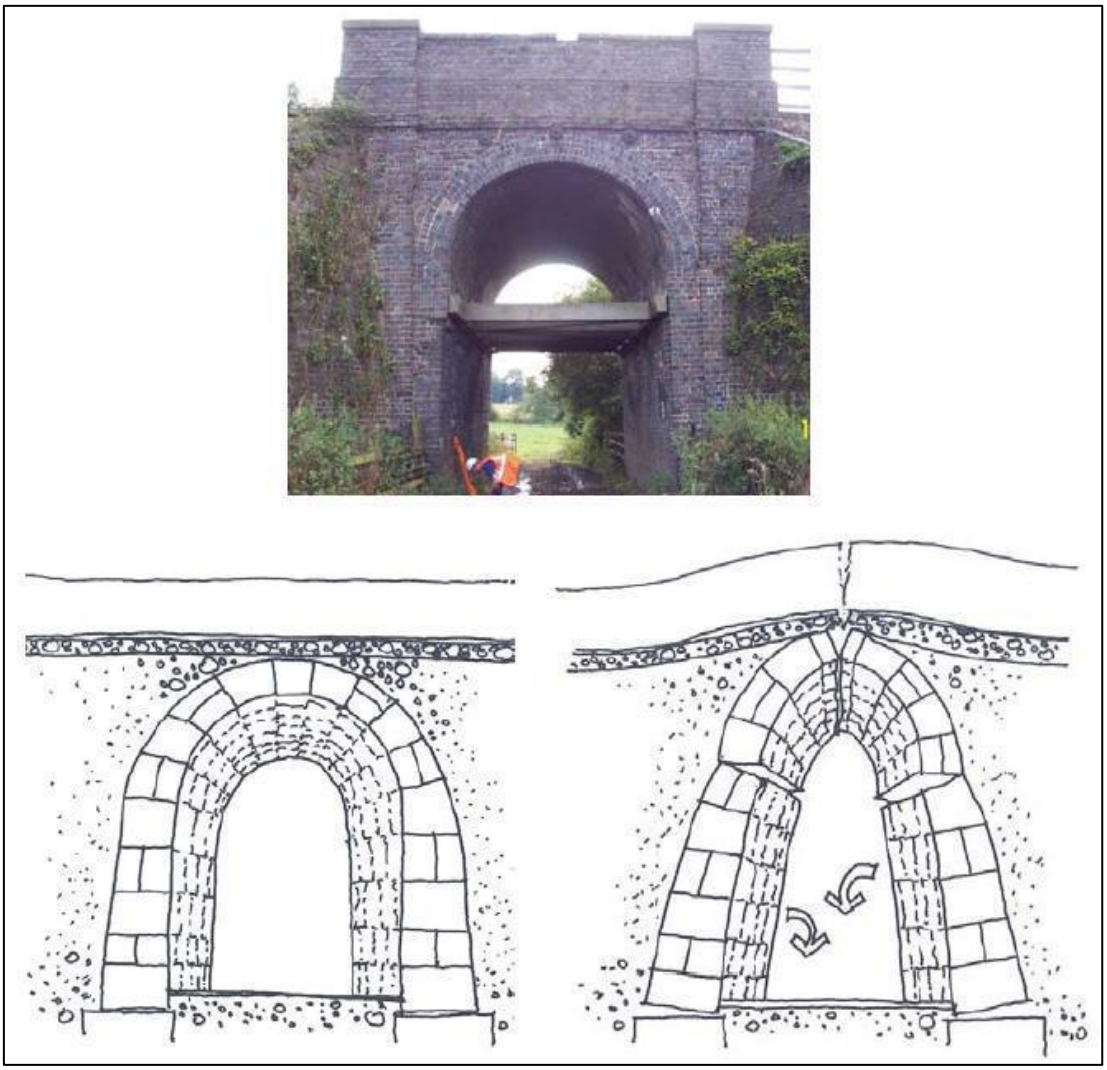
يبين الشكل (4-18) تضرر جسم القوس بسبب الدوران الداخلي للركيزة الطرفية والناتج عن الضغط الزائد للردميات.

- الهبوط الطولي والدوران

في هذه الحالة، ينتج الضرر عن الهبوط الشاقولي والدوران الطولي للركائز.

تجدر الملاحظة أنه ليس دائماً من السهل أو من الممكن تحديد أي نوع من الأضرار قد يحدث في هذه الحالة، إذ إنه يعتمد على عوامل مختلفة ومواد مختلفة (الحجـــر، نمـــط التربيط، الخ..)، النسب الهندسية، الشروط الحالية.

يجب ألا يستبعد الانزلاق النسبي للشرائح خاصة إذا وُجِد اختلاف بالصلابة بين طبقات الشرائح في كل طرف، وتعيين نقطة ثابتة (مرجعية).

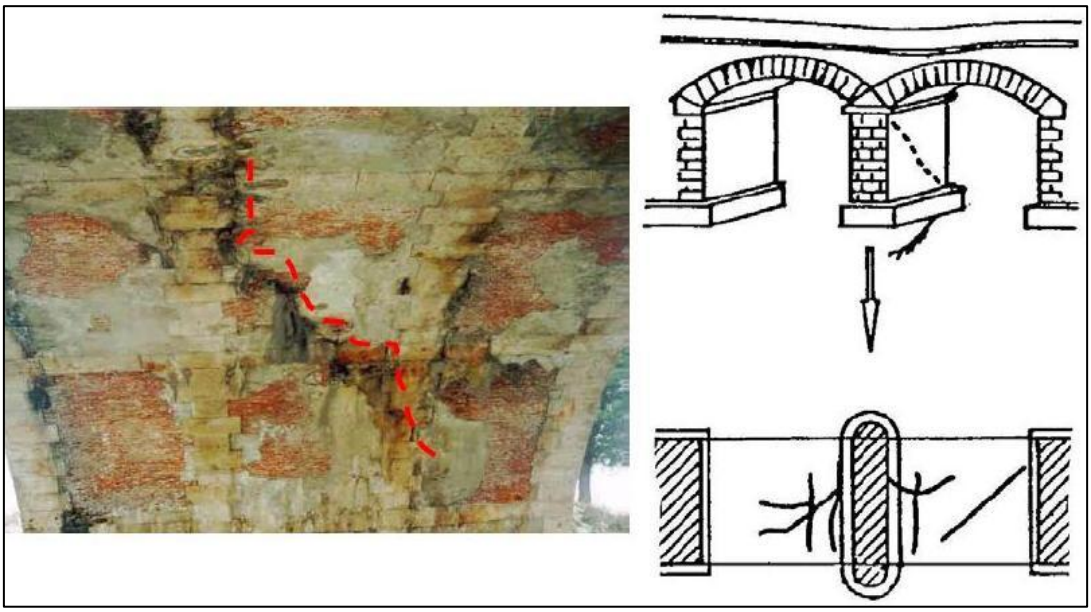


الشكل (4-19) الأضرار الحاصلة في جسم القوس والركائز الطرفية نتيجة دوران الركيزة الطرفية نحو الداخل

- الدوران العرضي على المحور الطولي للركيزة الطرفية أو الوسطية

يبين الشكل (4-20) مثال عن الدوران العرضي لركيزة بمحورها الطولي والذي يسبب تشقق مائل لها. تكون هذه التشققات عادةً مكثفة لكنها يمكن أن تخترق الحجر بشكل مائل نحو النقطة المرجعية في الأساس. وبالتالي تُحدِّد التشققات خط الضغط المقابل للحمولات المنقولة للأساس.

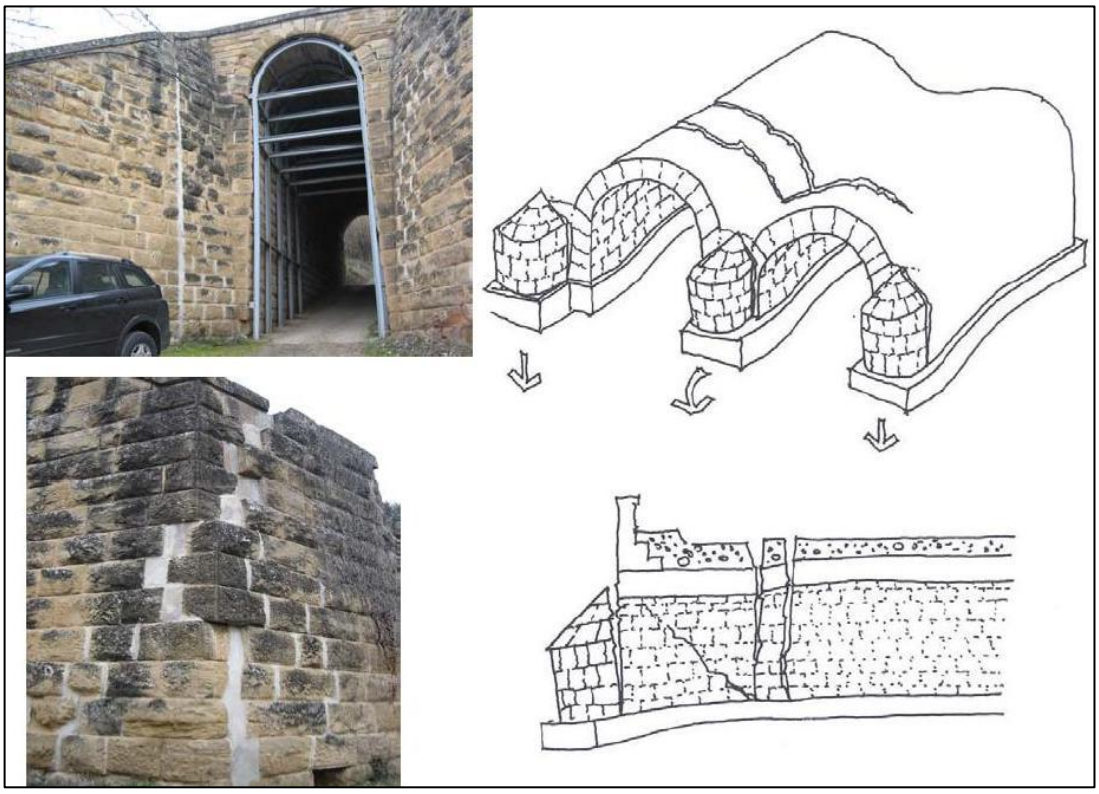
دوران الركيزة يسبب أيضاً فتل في جسم القوس. يَظهر هذا التشوه من خلال التشققات المائلة والتي تتكثف في الركيزة دون أن تسبب كسر الحجر وتتعلق بنمط الترابط وزاوية التشققات والمعاملات المادية للحجر.



الشكل (4-20) الهبوط التفاضلي أو الدوران العرضي على المحور الطولي للركيزة الوسطية أو الطرفية

- الهبوط العرضي للركيزة الطرفية أو الوسطية

يبين الشكل (4-21) مثال عن هذا النوع من الهبوط الذي يرتبط عموماً مع انهيار الواجهات الطولية للجسر.



الشكل (4-21) الهبوط النسبي للواجهة الطولية للجسر

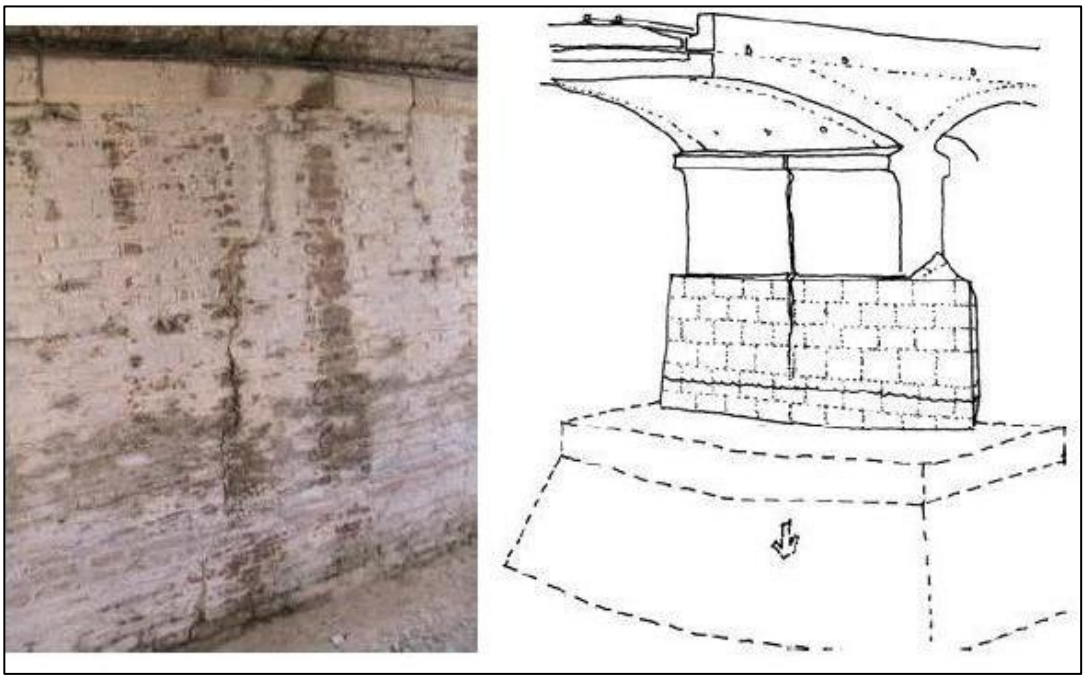
هناك ضرر إنشائي آخر يعود لقصور الأساس والذي يظهر على الركائز الطرفية والوسطية وجسم القوس. تظهر هذه الأضرار كنتيجة للتحنيب العرضي المُخفَّض بالهبوط ، والمترافق بالقص التشوهي الذي يسبب عادةً ظهور أضرار مرتبطة بالمتانة. هذا النوع من الضرر يؤثر على قدرة المنشأ ومتانته.

- الهبوط النسبي بين مركز وأطراف الركيزة

في بعض الأحيان لاسيما عندما يكون القوس عريض والركائز عريضة أيضاً، قد يحدث هبوط للجزء المركزي للركيزة بالنسبة لأطرافها بسبب الحمولة العالية في المركز وسلوك عناصر الأساس الطويلة.

يسبب الهبوط التفاضلي تحنيب عرضي للركيزة وبالتالي تشققات شاقولية على طول المفاصل أو حتى في الحجر أو الآجر والتي يمكن أن تستمر إلى جسم القوس.

عادةً، يبلغ عرض التشقق أعظم قيمة له أسفل الركيزة، وتقل قيمها عندما تصل إلى "الكتف" أو "التاج" كما في حالات التحنيب العادية.



الشكل (4-22) التشقق الشاقولي في الركيزة الوسطية بسبب الهبوط التفاضلي بين أطراف الركيزة وجزئها المركزي

إذا كانت حواف الركيزة بالقرب من (cutwater) فإنها تتعرض للهبوط أكثر من مركز الركيزة، والأضرار تحدث بالتعاكس مع عرض التشقق إذ تكون صغيرة جداً أو غير موجودة في الركيزة وعلى نطاق أوسع في جسم القوس. إن حدوث هذا النوع من الضرر يعتمد على قيمة الأحمال الموزعة على جسم القوس سواء كان مستقراً أو لا.

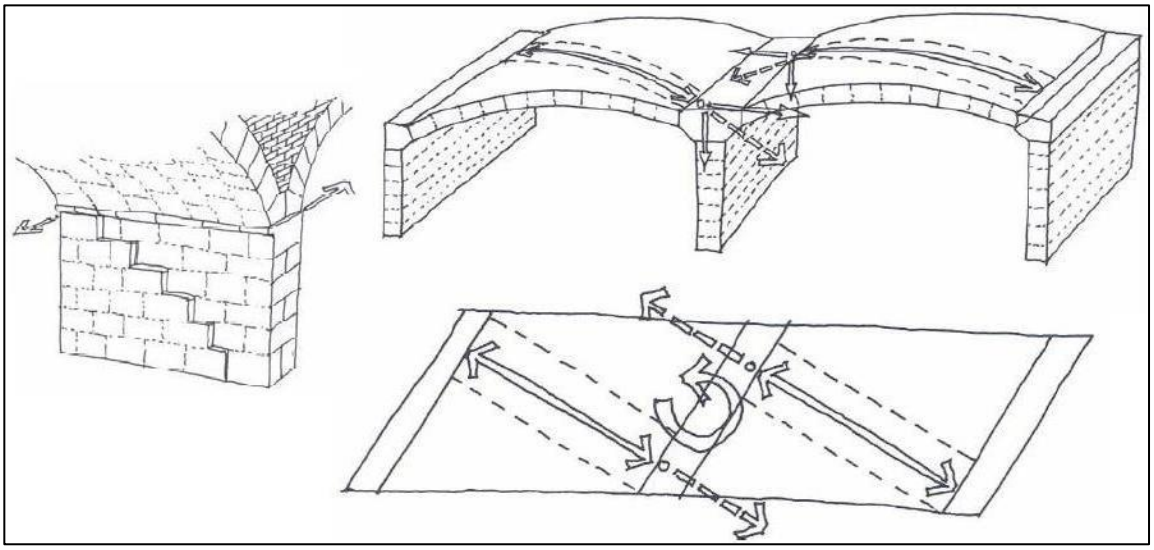
- أضرار إنشائية أخرى ناتجة عن مشاكل الأساس

وينبغي أن نلاحظ أيضاً وجود أضرار خفيفة، مثل فقدان الحجر من الردم أو الركائز الطرفية وما إلى ذلك نتيجة للقصور الموضعي لعناصر الأساس المتوضعة في الأسفل أو بسبب المشاكل المترافقة مع الدوران وانفصال الـ (cutwater).

ب- <u>مشاكل ناتجة عن مقاومة انحراف الجسور</u>

على الرغم من معرفة سلوك المنشأ إلا أن تصميم وبناء الجسور ذات المحور المائل على محور الطريق بالطرق الحديثة مثل الخرسانة المسلحة أو مسبق الإجهاد هو ابتكار حديث نسبياً (في الـ 40 سنة الماضية). يوجد عدد كبير من جسور السكك الحديدية الحجرية المائلة التي شيدت قبل (150) عام.

يجب أن يتعلق ميل الجسور الحجرية بالتربيط المستخدم في جسم القوس ونمـــط الركيـــزة. ميل القوس بالنسبة للفتحة يسبب تدفق قوى الضغط الرئيسية بالاتجاه المبين بالشـــكل (4-23). وهذا يصح فقط إذا كانت الركيزة قادرة على مقاومة الدفع دون تعرضها للحركة.



الشكل (4-23) مخطط جسر حجري مائل يؤدي لمشاكل تسبب تشوه الركيزة الوسطية

مشكلة أخرى مشتركة مع الجسور المائلة هي العيب المبين بالشكل (4-23). ميل الفتحـــة في المربع تسبب فتل في المحور الشاقولي للركيزة إذ إن محصلات رد الفعل الأفقي لهـــا قيمة مختلفة لكل جسم قوس (عند مرور قطار فوق أحدها فقط) ولها نقط تطبيق مختلفـــة، فإذا لم تكن الركيزة قوية جداً قد تدور أو تتشقق مسببة دفعها، إذا حدث ذلك يصبح الجســـر بفتحة مساوية لفتحة الميل.

ت- <u>مشاكل ناتجة عن السلوك الديناميكي</u>

قد تسبب الأحمال المتحركة ظواهر مختلفة في الجسور الحجرية القوسية:

- عيوب السكك الحديدية، ومع وجود نقاط المعابر، يسبب زيادة كبيـــرة فـــي التحميـــل الموضعي، والتي عندما تتكرر بشكل مستمر تؤدي في نهاية المطـــاف إلـــى حـــدوث قصور التعب المحلي.
- التأثير الديناميكي للردم قد يزيد أو ينقص من قيمة الدفع الأفقي علـــى الأجـــزاء فـــوق القوس.

ث- مشاكل ناتجة عن استخدام المنشأ

من الممكن أن تؤثر على المنشأ عدة عوامل مثل: التحميل، السرعة، الاتجاهات، تغيير الوضع الطولي والعرضي للمسارات، الخ، إذ قد تؤدي إلى تسريع عملية تدهور العناصر بسبب التعب، تركز الإجهاد في منطقة معينة والإفراط في تشقق العناصر.

ج- مشاكل دوران الركيزة الطرفية وجدران الأجنحة الناتجة عن ضغط التربة

يمكن لهذه الأنواع من المشاكل أن تكون متكررة وغالباً ما تكون نذيراً للانهيار. إن زيادة استخدام هذه المنشآت (الأحمال والسرعة الإضافيين)، والتدهور التدريجي للجسر وأنظمة التصريف في الردميات، من بين عوامل أخرى، تساهم في زيادة الضغوط على الركائز الطرفية والجدران. هذا يؤدي إلى انخفاض في مستوى السلامة ضد استقرار الركيزة الطرفية على الرغم من استناد هذه الركائز الطرفية على جسم القوس. يوضح الشكل (4-20) ما يحدث في كثير من الأحيان في المنشآت ذات الفتحات العميقة والقصيرة والدعامات المرتفعة.

يمكن العثور على أمثلة عن زيادة الدفع بالاتجاه الأفقي بسبب ضغط التربة والماء في عدد كبير من الحالات حيث تظهر على الجدران وأجنحة الجدران علامات واضحة للقصور.

ح- مشاكل ناتجة عن ضغط التربة على الأجزاء فوق القوس

وهي مشكلة معروفة وشائعة جداً. يُعتَبَر الدور الإنشائي للأجزاء فوق القوس رئيسي لاحتوائه الردم الموجود بين الأجزاء حول القوس والوجه الداخلي لجسم القوس. إضافة لذلك تعطي هذه الأجزاء التوازن وتطبق عليها المركبة الأفقية للحمولة الحية، وبالمثل يحدث ذلك للركائز الطرفية نتيجة ضغط الماء بسبب عدم وجود نظام تصريف فعال.

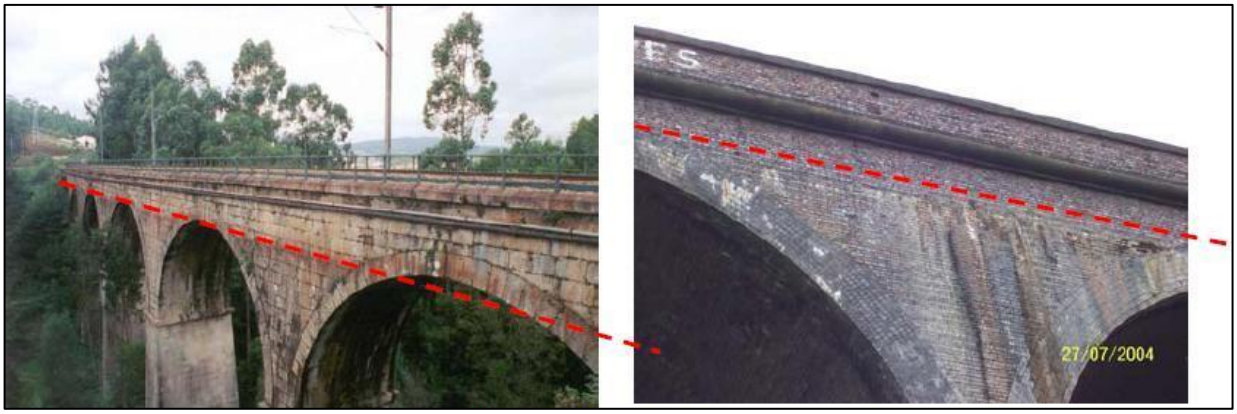
بوجود التأثير الأفقي المذكور أعلاه على الأجزاء فوق القوس، لن تكون الأضرار الإنشائية لها غير متوقعة: ميلان أو انتفاخ الأجزاء فوق القوس أو انفصالها عن جسم القوس والموجود غالباً عندما يكون الربط غير مناسب بين الشرائح وجسم القوس. ومن المعروف عن الأجزاء فوق القوس، أن انفصالها عن جسم القوس وخضوعها لضغط الردم يجعلها غير مستقرة ويعرضها للسقوط.

خ- مشاكل ناتجة عن اختلاف الصلابة بين جسم القوس والأجزاء حوله

يمكن لزيادة صلابة العناصر الموجودة حول القوس بالمقارنة مع جسم القوس أن تسبب تشققات بين هذين العنصرين تحت تأثير التحميل الشاقولي. هذا يمكن أن يؤدي إلى استجابة مستقلة لجسم القوس لأحمال الخدمة.

د- مشاكل ناتجة عن عملية البناء

هذا النوع من الضرر تراكمي لأنه يعود الى زمن بناء المنشأ. بينت التجربة أن العمليات المختلفة والمراحل المختلفة المستخدمة في بناء هذه الجسور لها تأثير يدل على القدرة الإنشائية وقدرة التحمل كما يوضح الشكل (4-24).



الشكل (4-24) مستويات الردم الصلبة، وجود بقع ماء

ذ- مشاكل ناتجة عن التدخلات السابقة

لسوء الحظ، لا تكون الترميمات السابقة ملائمة دوماً. فإذا كانت هذه الترميمات تنفذ دون أخذ تأثيراتها بعين الاعتبار تكون النتائج غير فعالة دائماً وتكون أحياناً ذات نتائج سلبية تنعكس على متانة المنشأ وقدرة تحمله. قد تكون نتيجة لاستخدام مواد غير متوافقة مثل الملاط الإسمنتي والملاط الكلسي، ومشاكل أخرى متعلقة بجماليات الجسر القائم. يجب تجنب إجراء التدخلات الضارة كالحلقات الإسمنتية الداخلية عند ظهور مشاكل المتانة. كما يمكن أن تسبب أعمال رفع كفاءة المنشأ مثل الدعامات المعدنية حركات مختلفة بسبب اختلاف السلوك الحراري. وقد تنشأ مشاكل أخرى من تكهرب خطوط الكهرباء مع العناصر المعدنية المرتكزة على الحجر.

4-3- اكتشاف الأضرار والكشف عنها وتشخيصها

ترتبط أكثر الأضرار شيوعاً مع كل عنصر إنشائي (جسم القوس، الأوتاد، الدعامات، العناصر حول القوس، أجنحة الجدران والجدران) وهي مذكورة أدناه مع الأخذ بعين الاعتبار السلوك العام للمنشأ. وهكذا يتم التعرف على الضرر بأنه ضرر مشترك لعناصر المنشأ المختلفة.

4-3-1- أضرار الركائز الوسطية

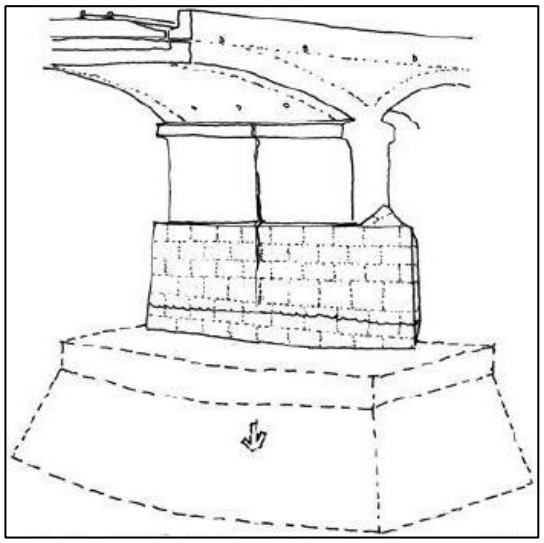
4-3-1-1-التشققات الشاقولية في الركيزة الوسطية

يحتاج هذا النوع من الضرر لمعالجة فورية إذ إنه يحذر من حدوث انهيار فوري وكارثي بسبب قصور المادة.

في هذه الحالة، يكون الضرر فادحاً بسبب نمط الانهيار. ولحسن الحظ أن الركائز تكون معرضة عادةً لضغط أقل بكثير من قدرة تحمل مادة البناء. ومع ذلك فإن زيادة الأحمال وتدهور السطح الخارجي للحجر والردم الداخلي قد تؤدي لانهيار هذه العناصر الأساسية.

علامات التحذير تكون عادةً تشققات شاقولية مع انكسار وسقوط أجزاء من الحجر، تتضرر أطراف الركيزة بسبب تركز قوى الضغط.

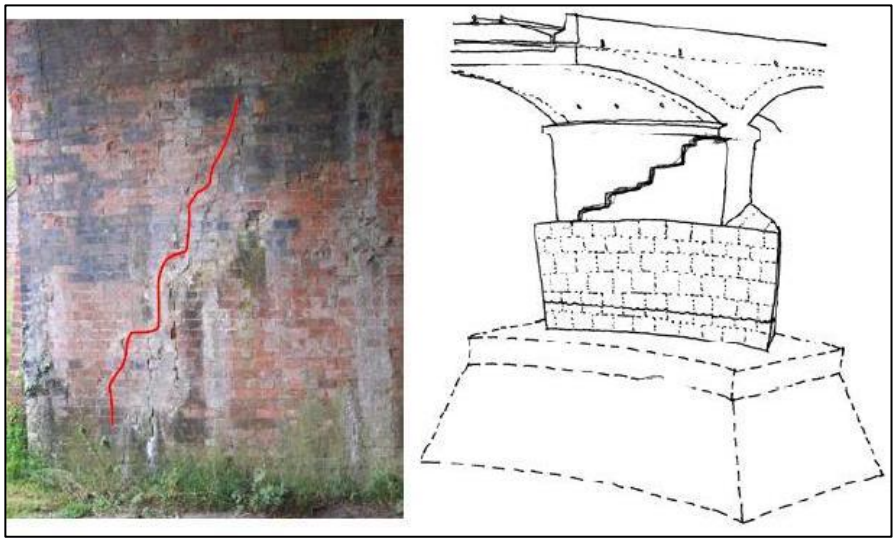
من الشائع أن يكون للجسور ذات الأساسات المقوضة هبوطاً تفاضلياً للركائز وبالتالي تحدث التشققات الطولية في الركيزة؛ الشكل (4-25).



الشكل (4-25) التشققات الطولية في الركيزة الوسطية

4-3-1-2- التشققات المتدرجة

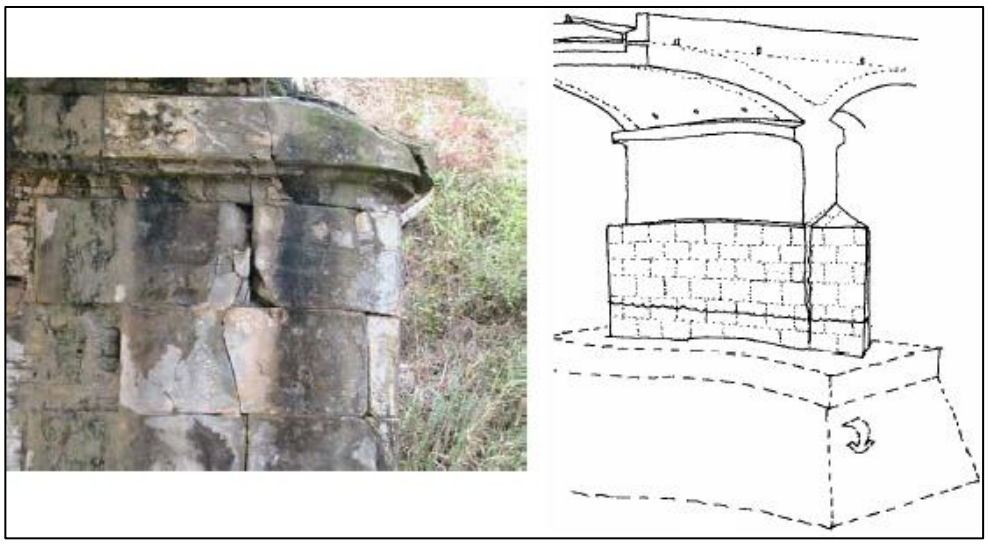
يرتبط هذا الضرر بدوران الأساس حول المحور الأفقي والطولي. يحدث عادةً عند حدوث قصور موضعي لقاعدة الركيزة بسبب الدوران في مستوي الركيزة أو بسبب الهبوط التفاضلي لنهايات ومركز الركيزة. ويحدث أيضاً بسبب فتل المحور الشاقولي الناجم في الركيزة في الجسور المائلة.



الشكل (4-26) التشقق المتدرج في الركيزة

4-3-1-3- التشققات الشاقولية بين الـ (cutwater) والركيزة الوسطية

تحدث بسبب مشاكل الأساس عندما تكون الـ (cutwater) مبنية بشكل غير متجانس مع الركيزة وتنفصل عند دوران أو هبوط الركيزة.

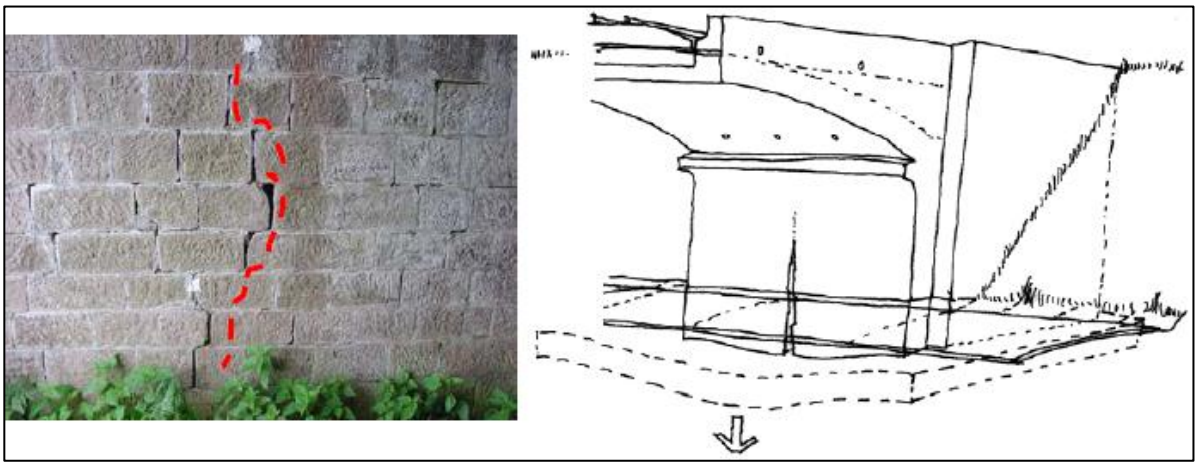


الشكل (4-27) التشققات الشاقولية بين الـ (cutwater) والركيزة الوسطية

4-3-2- أضرار الركائز الطرفية

4-3-2-1- التشققات الشاقولية في الركائز الطرفية

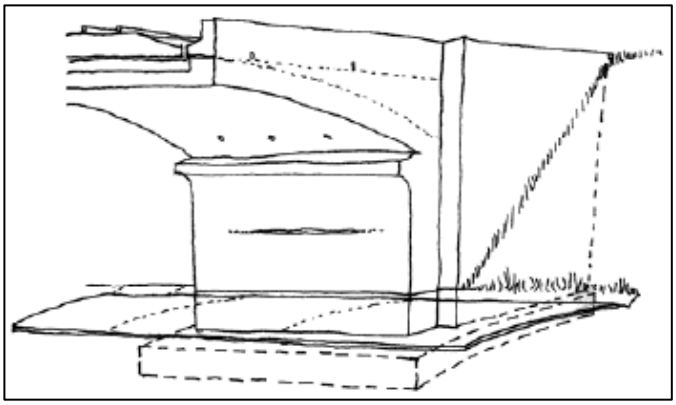
لهذا الضرر أسباب وأعراض مماثلة للتشققات الشاقولية في الركائز الوسطية. وهو يتشكل عادةً في مركز الركيزة الطرفية.



الشكل (4-28) التشققات الشاقولية في الركيزة الطرفية

4-3-2-2- التشققات الأفقية

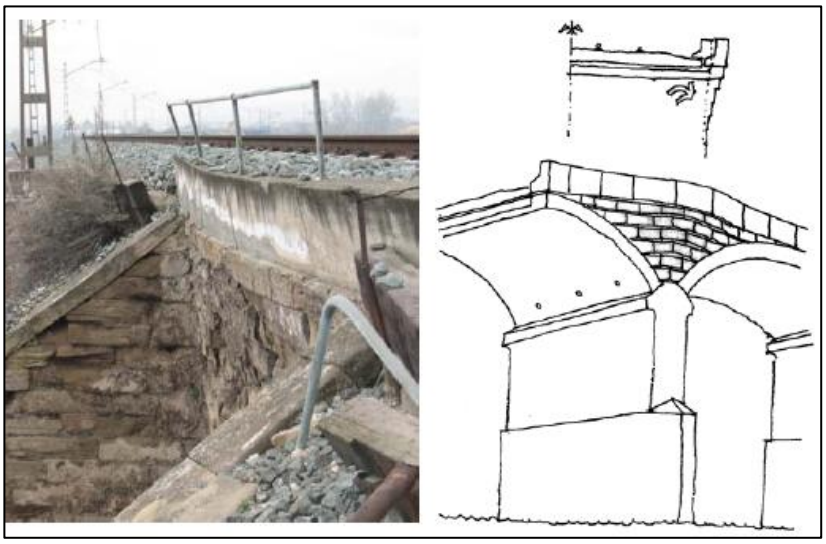
التشققات الأفقية شائعة في مركز الركائز الطرفية للجسور المسطحة جـــداً (f/L < 1/6) وذلك عندما لا تكون الركائز الطرفية قادرة على مقاومة الدفع الأفقي المنقول عبـــر جسم القوس.



الشكل (4-29) التشققات الأفقية في الركيزة الطرفية

4-3-2-3- انتفاخ الأجزاء فوق القوس

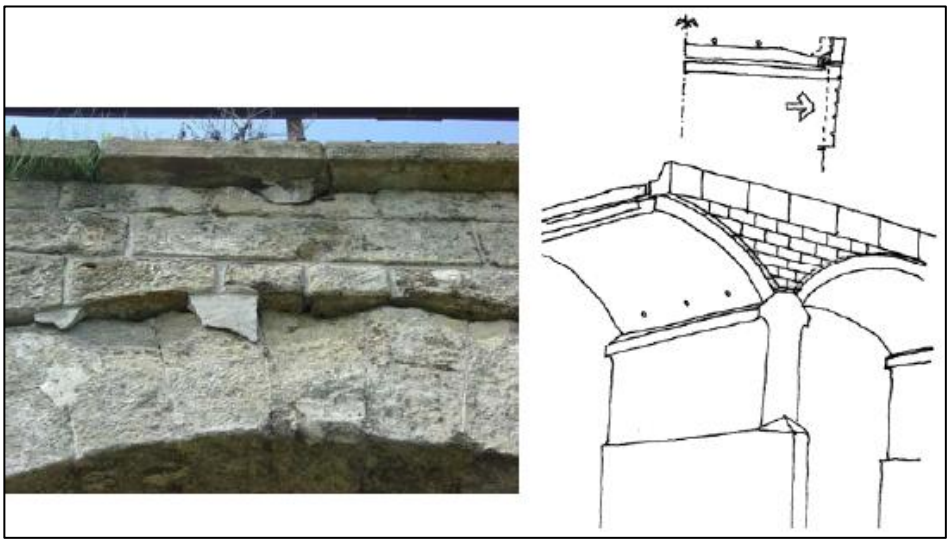
تحدُث هذه المشكلة بسبب ضغط الأرض الناتج عن الردم والمياه المحفوظة داخـــل الجزء أعلى القوس، وكذلك عن المركبة الأفقية للثقل والأحمال الحية. الشكل (4-30).



الشكل (4-30) انتفاخ الجزء فوق القوس

4-3-2-4- انزلاق الجدران فوق القوس

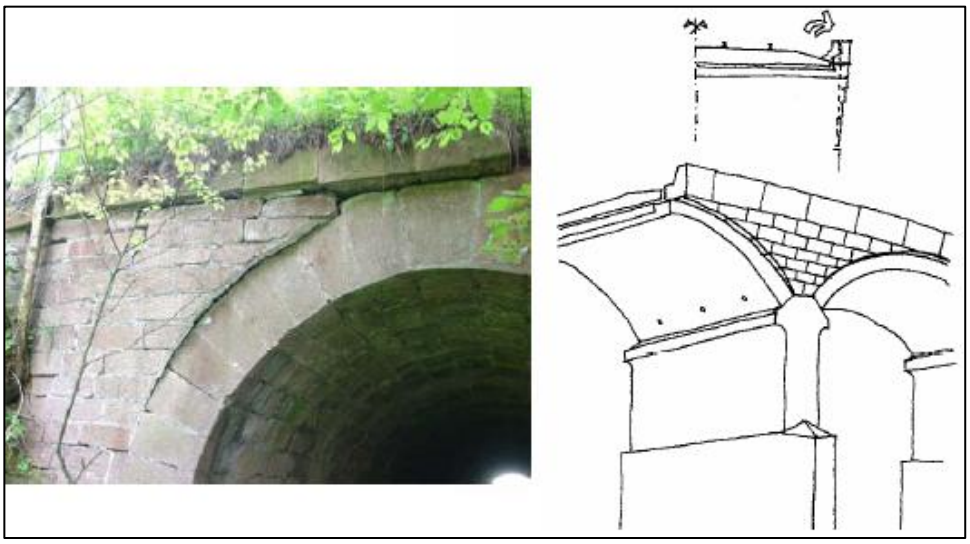
يحدث هذا الضرر عادةً عندما يكون ضغط الردم، بالإضافة إلى القوة الأفقية الناجمة عن المياه المخزنة، والثقل والتأثيرات الخارجية أكبر من تأثير الاستقرار الناتج عن الحمل الميت للجدار فوق القوس مضروباً بمعامل احتكاك العقدة. من المهم جداً معرفة الأدوات المستخدمة لربط العناصر فوق القوس مع جسم القوس ومعرفة العرض الفعلي لهذه العناصر عند الوجه الخارجي للقوس.



الشكل (4-31) انزلاق الجزء فوق القوس

4-3-2-5-دوران الجدران فوق القوس

يحدث دوران الجدران فوق القوس، دون انزلاقها، لأن عزم الانقلاب الناتج عن الردم والماء والأحمال الحية يكون أكبر من عزم التثبيت. هذا الضرر من خصائص الجسور المتضيقة ذات جسم القوس المسطح والعميق وردم بعمق كبير.



الشكل (4-32) دوران الجزء فوق القوس

4-3-2-6-التشققات المتدرجة في الجدران فوق القوس

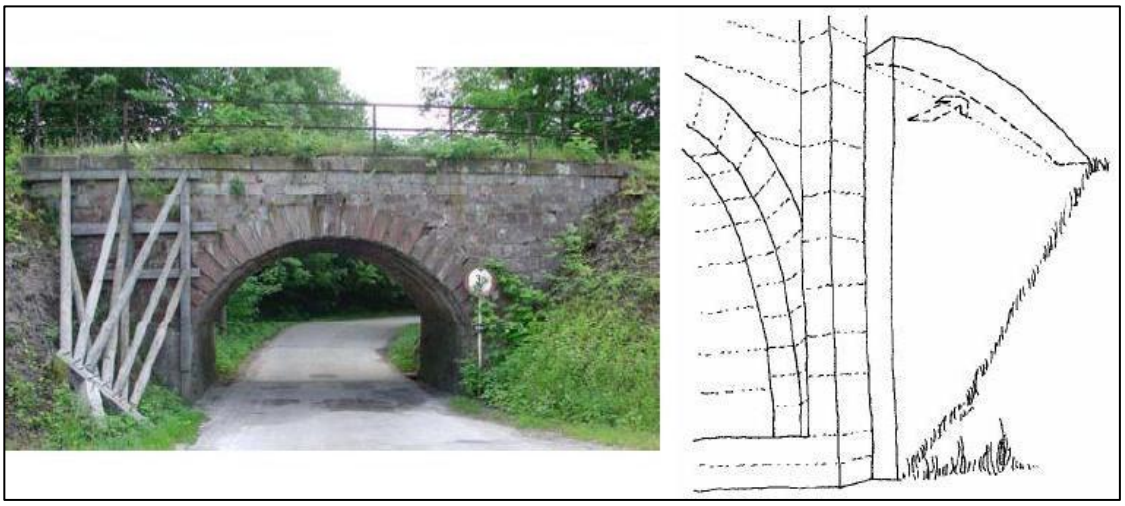
هذا النوع من الضرر هو نتيجة لميل جسم القوس بحيث ينقسم القوس إلى ثلاثة أو أربعة أجزاء، ويعود ذلك إلى ضعف القوس بسبب إزالة الدعامات الإنشائية عند بنائه قبل وقتها.

الشكل (4-33) التشققات المتدرجة في الجزء فوق القوس

4-3-3- أضرار جدران الأجنحة والجدران الجانبية

4-3-3-1- الدوران والانتفاخ

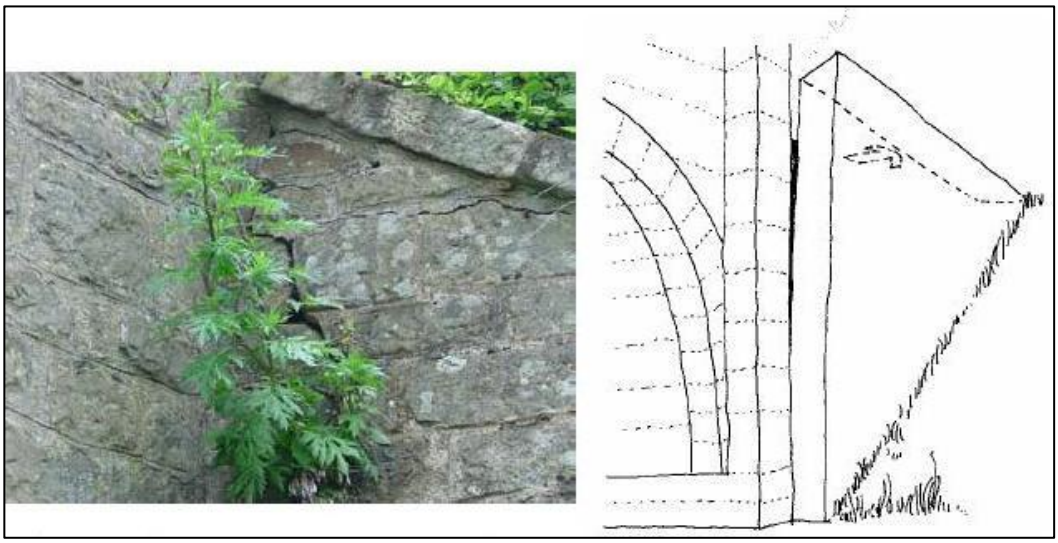
إن لجدران الأجنحة والجدران الجانبية اعتبارات مماثلة للجدران فوق القوس. وكما ذكر سابقاً، يمكن أن ينشأ هذا النوع من الضرر من عدم فعالية أو عدم التصريف من الردم، ومنها ما قد يكون بسبب سد الثقوب الارتشاحية، زيادة الضغط الأفقي على الجدران مما يسبب دوران أو انتفاخ الجدار؛ الشكل (4-34).



الشكل (4-34) دوران وانتفاخ جدران الأجنحة والجدران الجانبية

4-3-3-2- التشققات الشاقولية في العقدة بين الركيزة الطرفية وجدران الأجنحة والجدران الجانبية

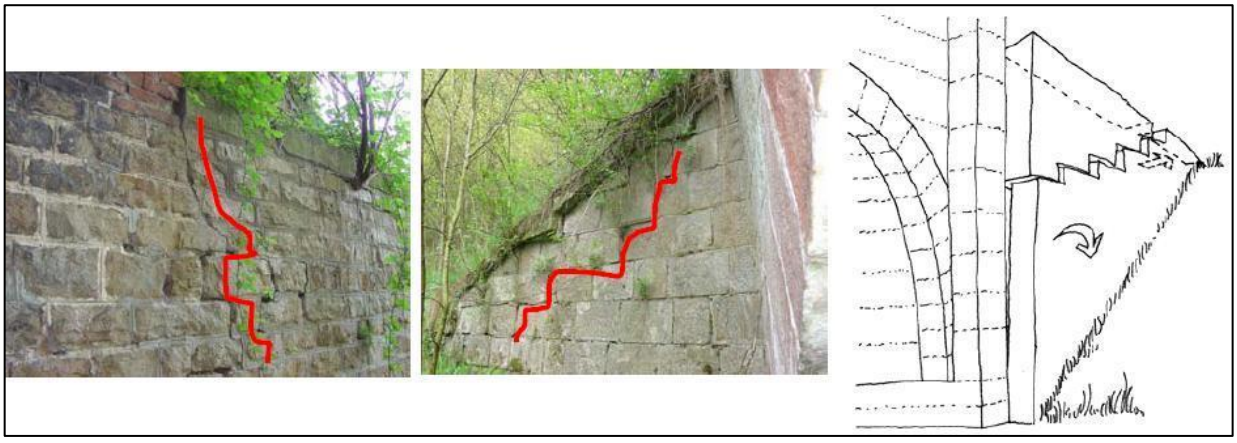
ينتج هذا النوع من الضرر بسبب حركات مختلفة لعناصر الجدار. تتصل الركائز الطرفية مع الجدران فوق القوس وجسم القوس، في حين تملك جدران الأجنحة والجدران الجانبية حركة أفقية حرة وخاصةً في الجزء العلوي من الجدار.



الشكل (4-35) التشققات الطولية بين الركيزة الطرفية وجدران الأجنحة والجدران الجانبية

4-3-3-3- التشققات المتدرجة

يحدث هذا الضرر بسبب تباين الهبوط في مستوي جدار الجناح أو الجدار الجانبي.الشكل(4-36).

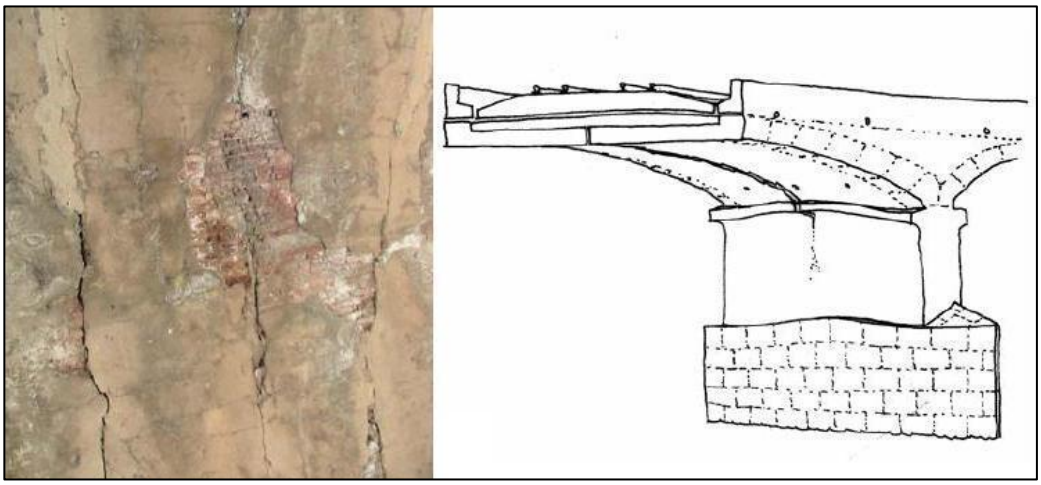


الشكل (4-36) التشققات المتدرجة في جدران الأجنحة أو الجدران الجانبية

4-3-4- أضرار جسم القوس

4-3-4-1- التشققات الطولية في منتصف جسم القوس

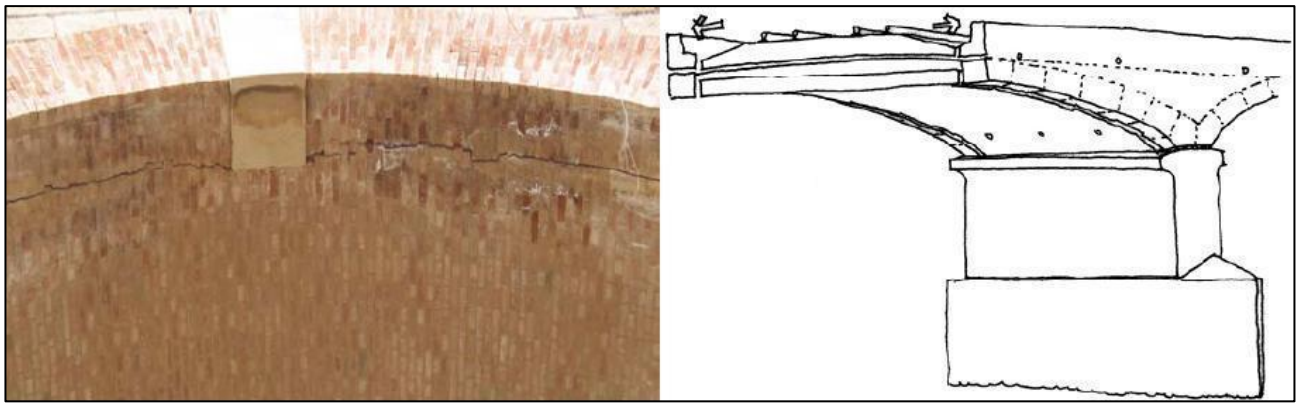
يمكن أن ينتج هذا الضرر من أسباب مختلفة، فقد ينتج بسبب الهبوط النسبي لمركز الركيزة بالمقارنة مع أطرافها. أو من التحنيب العرضي وقوى الفتل المحوري الموجودة في جسم القوس. وثمة حالة خاصة عندما يكون مسار العربات غير متناظر بالنسبة للمحور الطولي للجسر. يبين الشكل (4-37) رسم تخطيطي ومثال عن هذا الضرر.



الشكل (4-37) التشققات الطولية في جسم القوس

4-3-4-2- التشققات الطولية بين الشرائح وجسم القوس

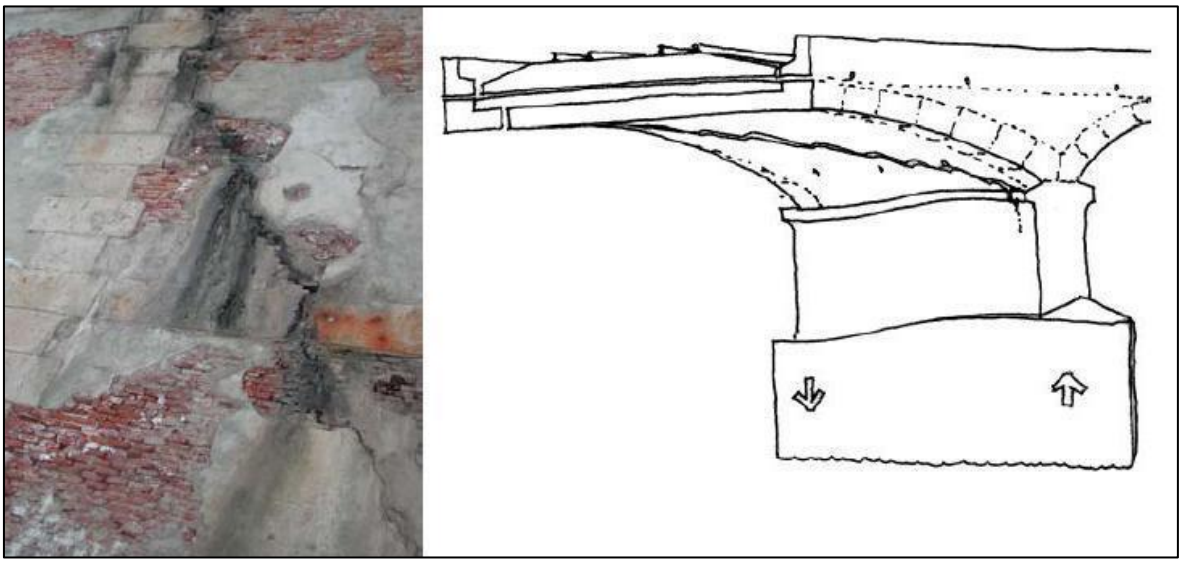
تم التحدث عن هذا النوع من الضرر سابقاً. يبين الشكل (4-38) مثال عنه.



الشكل (4-38) التشققات الطولية بين الشرائح وجسم القوس

4-3-4-3- التشققات القطرية في جسم القوس

يمكن أن ينتج هذا الضرر من عدة أسباب، فقد ينتج عن السلوك العادي لجسم القوس المائل مع تربيط غير مناسب. ويمكن أن يكون أيضا أحد أعراض الهبوط ودوران الركيزة الذي يؤدي إلى تشوه جسم القوس كما هو مبين في الشكل (4-39). في هذه الحالة يحدث التشقق المائل بسبب الدوران حول المحور الطولي للمسند. هذا الدوران التفاضلي يسبب قوى فتل على جسم القوس، مما يسبب تشقق بالاتجاه القطري من الطرف الأيمن للمساند إلى الطرف الأيسر.



الشكل (4-39) التشققات القطرية في جسم القوس الناتجة عن الدوران التفاضلي للركيزة

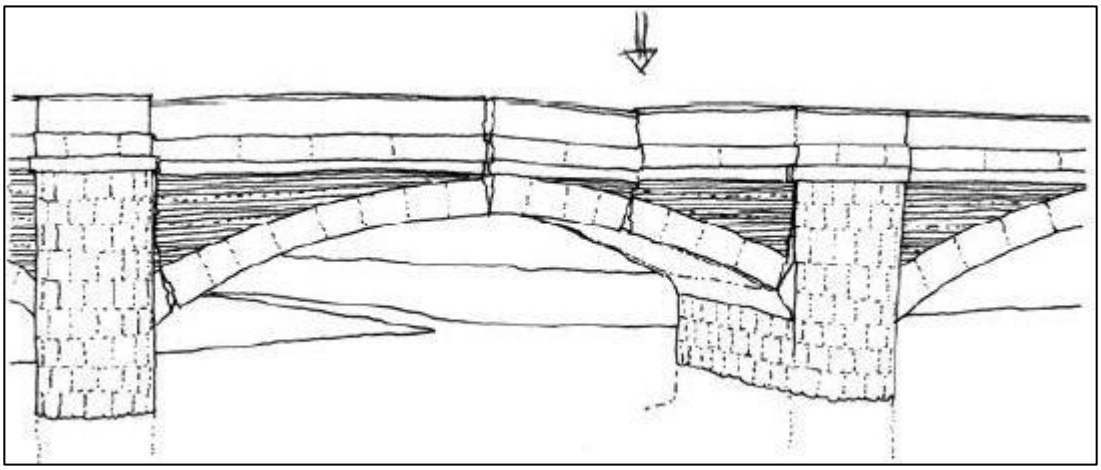
4-3-4-4- التشققات العرضية في جسم القوس

ليس من الضروري أن تسبب التشققات العرضية ضعف في قدرة التحمل لكنها قد تحوّل جسم القوس إلى منشأ ذي ثلاثة أوتاد. كما ينبغي تسجيل وجود أي تشقق عند وضع تقرير المعاينة للتمكن من تقييم تأثير ذلك على قدرة التحمل وبهدف دراسة تطوراتها.

وأثناء عملية البناء يتعرض المنشأ في مرحلة ما إلى لامركزية، وبالتالي وتحت تحمل جسم القوس لوزنه الذاتي يحدث دوران في الشرائح مسبباً تشوهاً مرناً بتأثير الضغط وكذلك تحويل الضغط الأفقي إلى قاعدة الركائز الطرفية مما يمكن أن يؤدي إلى حدوث حركات أفقية. كل هذه الظواهر تسبب تطور المفاصل في الجهة الداخلية للحلقات والجهة الخارجية لتاج القوس مما يؤدي إلى حدوث الشقوق العرضية والتي يمكن أن تكون مرئية على الوجه الداخلي للتاج.

4-3-4-5- التشققات العرضية (آلية القوس الواحدة)

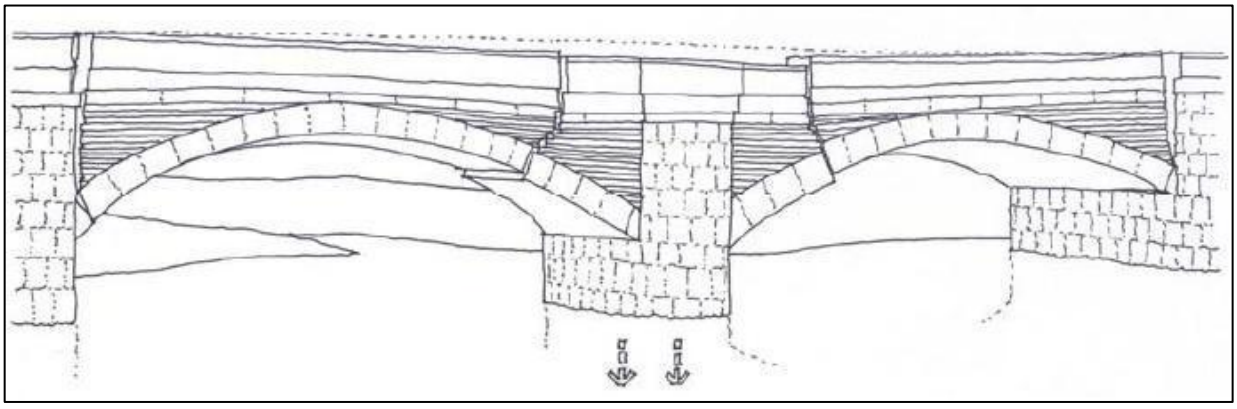
من المعروف في الجسور الحجرية القوسية أن قوة الضغط للحجر أكبر من المستوى العام للإجهاد في جسم القوس. لذلك من المعروف عموماً أن انهيار جسم القوس الحجري بشكل منفرد سيحدث بسبب تشكل ميكانيكية انهيار. وهكذا يجب غالباً (وليس دائماً) أن يسبب تشكل أربعة مفاصل لحدوث الانهيار تحت تأثير الحمل الحي المطبق. يوضح الشكل (4-40) حدوث الانهيار.



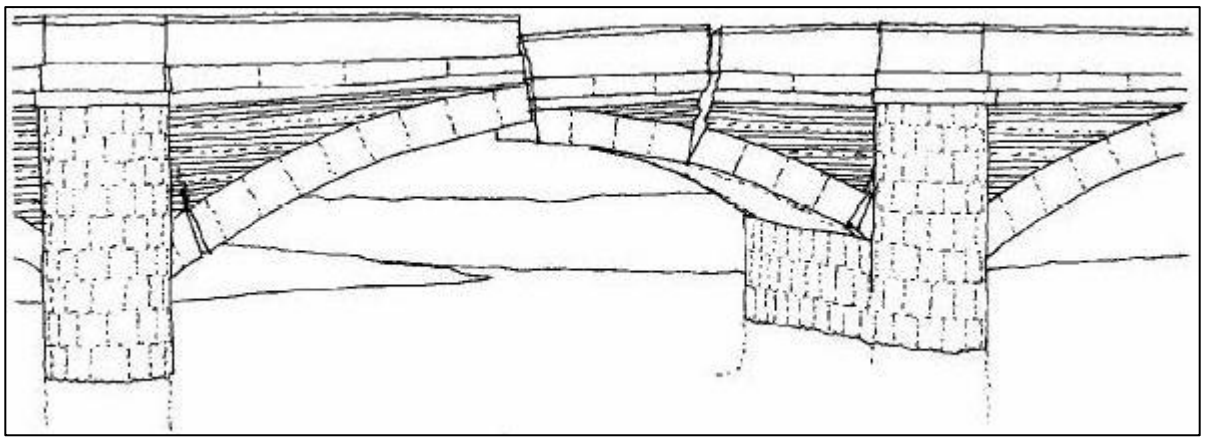
الشكل (4-40) آلية حدوث الانهيار بتشكل أربعة مفاصل (آلية القوس الواحدة)

4-3-4-6- التشققات العرضية في جسم القوس (آلية القص)

إن تكوُّن آلية القص نادر جداً. تحدث عادةً بسبب هبــوط الأساســات. الشكل (4-41-1) و(4-41-2).



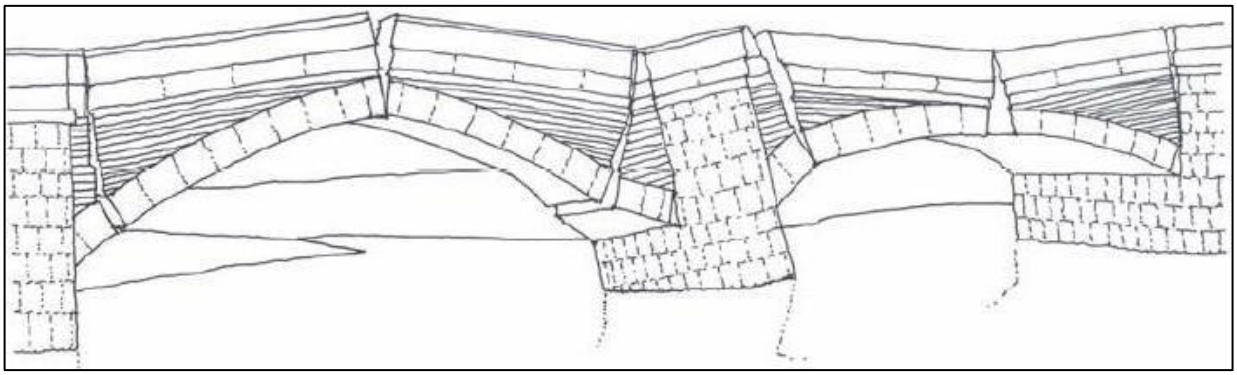
الشكل (4-41-1) هبوط الركيزة الوسطية والأضرار الناتجة عنها



الشكل (4-41-2) حدوث الانهيار بسبب تشكل المفاصل وحدوث القص

4-3-4-7- التشققات العرضية في جسم القوس (آلية الأقواس المتعددة)

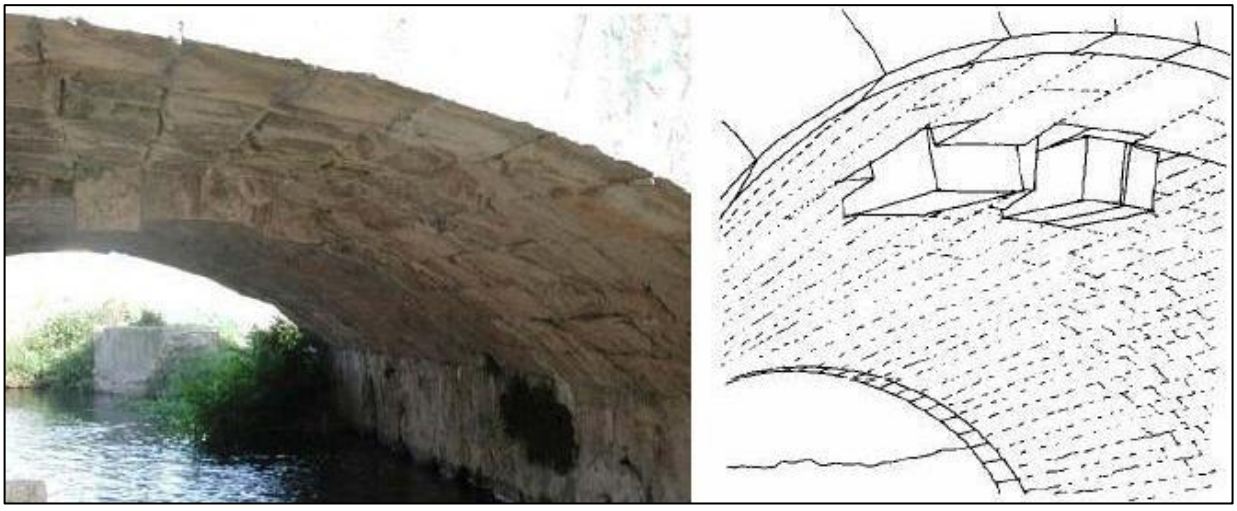
تحدث آلية الأقواس المتعددة عند تشكُّل سبعة مفاصل، كما هو مبين بالشكل (4-42).



الشكل (4-42) حدوث الانهيار بسبب تشكل سبعة مفاصل وفق آلية الأقواس المتعددة

4-3-4-8- فقدان أو انتقال عناصر القوس

يمكن أن ينشأ هذا الضرر بسبب تأثير الأحمال أو المتانة أو كليهما؛ الشكل (4-43). وإذا كان منشأ الضرر يعود إلى عدم قدرة تحمل الأحمال، يكون ذلك بسبب تحرك المساند في جسم القوس؛ أو في حالات نادرة، بسبب فقدان القوى المحورية في جسم القــوس، أو بسبب التحميل الموضعي بالقرب من تاج جسم القوس عندما يكون ارتفاع الردم بالقرب من التاج قليل (h_0<0.40m).

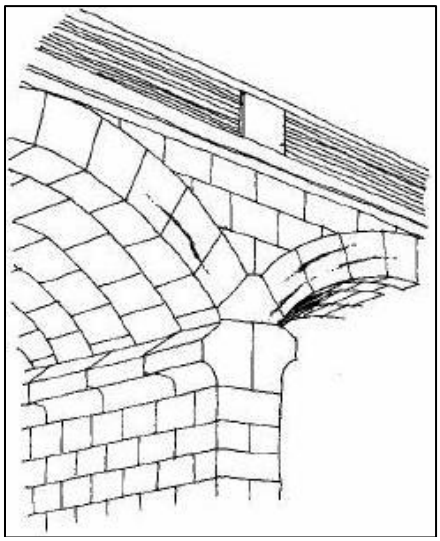


الشكل (4-43) تساقط القطع الحجرية من جسم القوس

4-3-4-9- آلية قصور الجسور الحجرية القوسية (قصور التشققات الحجرية الصغيرة: القص، معيار القص المحوري)

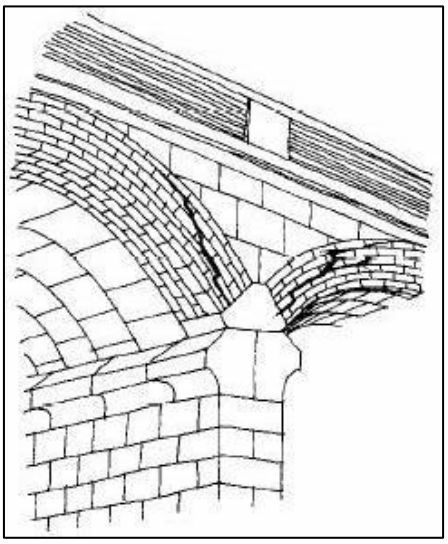
تم سابقاً وصف كيفية حدوث الانهيار من خلال تشكل الميكانيكيات في الجسور الحجرية القوسية وفي حالات معينة قد يحدث الانهيار بسبب قصور المواد. هذه الحالة، على سبيل المثال، من أجل بلاطة جسم قوس نحيفة ذات مجاز قصير حيث يكون مستوى إجهادات الضغط فيها مرتفع ويزداد بسبب تغير شروط الاستخدام (في هذه الجسور نسبة الدفع الناتج عن الأحمال الحية أكبر من الناتج عن الأحمال الميتة). ولذلك، في مثل هذه الحالات يكون الحد الحرج هو قدرة تحمل المواد الحجرية.

بالنسبة للركائز، عند التحقق من قصور هذا النوع يجب الأخذ بعين الاعتبار إمكانية حدوث الانعطاف والقص. هذا ليس مألوفاً في المجازات الطويلة ذات جسم القوس المسطح، بما أن مركز خط الضغط يقع على مركز مقطع القوس فإن عزوم الانعطاف وقوى القص تكاد لا تذكر. يبين الشكل (4-44) مثال عن قصور ميكانيكي للحجر حيث القوة المسيطرة هي الضغط، والتربيط متعامد مع اتجاه الدفع. يتصف القصور العام بوجود تشققات موازية لاتجاه الضغط.



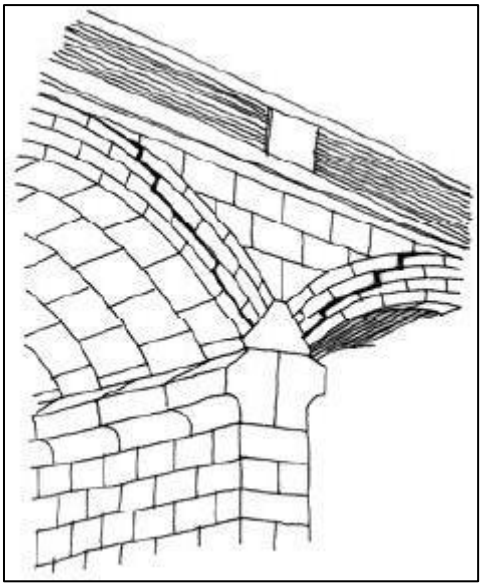
الشكل (4-44) ميكانيكية قصور الحجر. المعيار I

ومع ذلك، فإن التفاعل بين الانعطاف المحوري وقوى القص يمكن أن يصبح محدوداً، حتى لو لم يكن متكرراً جداً. وبالتالي الحجر الآجري هو الاكثر قابلية لحدوث هذا النوع من الضرر (لأن خصائص المادة ضعيفة). الشكل (4-45).



الشكل (4–45) ميكانيكية قصور الحجر. المعيار II

عندما تكون قوة الضغط العمودية على المفصل صغيرة، يمكن أن يحدث بين الحجر أو الآجر انزلاق دون قصور المادة. الشكل (4–46) مثال جيد عن هذه الحالة.



الشكل (4–46) ميكانيكية قصور الحجر. المعيار III

4–4– الأضرار الناتجة عن ضعف المتانة

ينتج عدد كبير من الأضرار في الجسور الحجرية القوسية بسبب ضعف متانة المواد المستخدمة في بنائها، وبالتالي، تحدث هذه الأضرار بسبب عمليات تدهور مختلفة لهذه المواد وتغيرات تدريجية تحدث عليها. الشكل (4–47).

الشكل (4–47) تدهور المواد المستخدمة في البناء

ومن المهم أن نشير إلى أن المنشآت الحجرية، ولا سيما ذات الأحجار جيدة الترابط، ذات متانة ممتازة وأفضل من المنشآت المشيدة بمواد أخرى مثل الإسمنت المسلح أو الفولاذ، ذلك لأن الحجر هو مادة خام طبيعية. قد يتجاوز عمر هذه المنشآت القديمة في بعض الحالات 150عام، قد يبدو عليها تدهور خطير والذي مع الوقت يمكن أن يؤثر على سلامتها إذا لم تتم السيطرة عليه.

ولذلك، فإن هذه الدراسة تسعى لأن تصف وتصنف هذه الأنواع من الأضرار كالتالي:

- بسبب التدهور الناتج عن التجوية أو التغيرات الكيميائية للمواد التي لا تؤثر على سلوك تحمل الأحمال، قد تحدث أضرار أخرى خطيرة أو يمكن أن تؤدي إلى أضرار تضع قدرة تحمل المنشأ موضع شك. لذلك يجب معرفة عمر هذه المنشآت وكيفية انتشار الضرر.

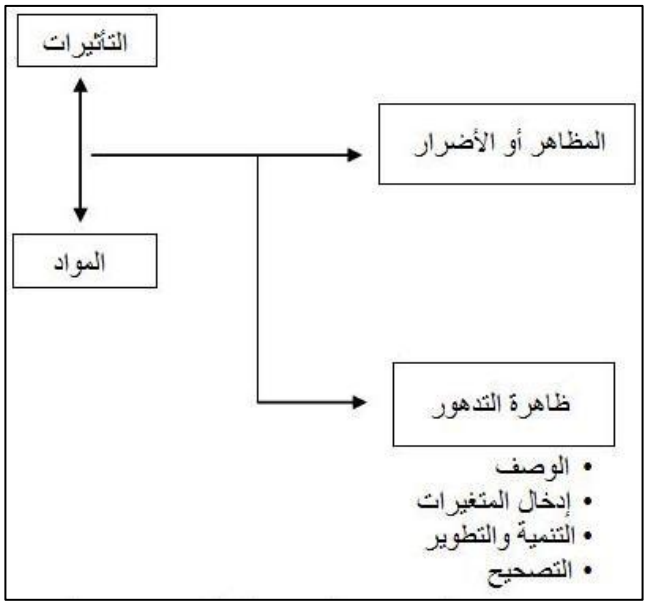
- في الوقت الحاضر، من المتعارف عليه عموماً من قبل المهندسين أنه ينبغي النظر في متانة المنشآت خلال جميع مراحل حياتها (التصميم، البناء، الصيانة) وليس من المنطقي عدم تحليل متانة المنشآت القوسية المشادة منذ أكثر من قرن.

- ليس من السهل عموماً أن نفهم سلوك هذه المنشآت عند خضوعها للأحمال، ويوجد غموض حول التدهور وظاهرة التجوية التي تحدث في الحجر. في بعض الحالات، قد

يؤثر الضرر الناتج عن عدم كفاية قدرة التحمل أو المتأثر بمقاومة المنشأ بشكل سلبي على الضرر الناتج عن ضعف المتانة والعكس بالعكس.

قامت العديد من الدراسات على تحليل السلوك الميكانيكي للحجر وخصائصه المؤثرة على عمليات التدهور. وبالتالي، لا يوجد نظام تصنيف يميز بشكل واضح طبيعة ومَنشأ أكثر الأضرار شيوعاً في هذه المنشآت والذي يوضح ويشرح العمليات المختلفة التي تحدث. من جهة، تحدث الأضرار بسبب تدهور المادة والتغيرات الكيميائية فيها بينما تؤثر الأضرار من جهة أخرى على مقاومة المنشأ. تحاول هذه الدراسة أن تستعرض قدر الإمكان آليات تدهور المواد وآليات التغيير والعمليات الأكثر شيوعاً المتعلقة بالحجر وكذلك وصف أسبابها ومظاهرها.

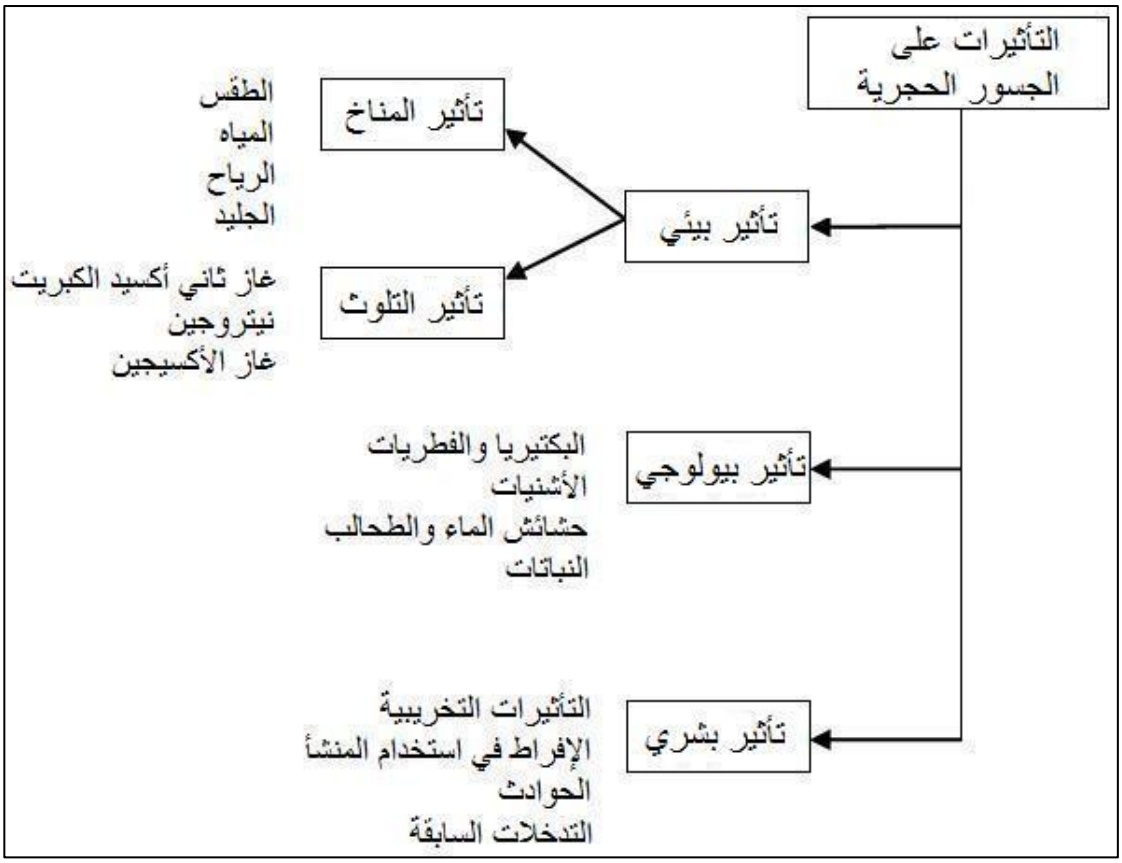
- تم دراسة التأثيرات الخارجية على الحجر وصنف كالتالي:
  1. التأثيرات المحيطية: تأثير المناخ والتلوث.
  2. التأثيرات البيولوجية (الطحالب، الأشنيات، النباتات، الخ).
  3. تأثيرات الإنسان: مثل التخريب فضلاً عن الحوادث والتدخلات السابقة غير المناسبة.
- تم وصف آليات التدهور التي تسبب الضرر.
- تم دراسة ظهور الأضرار الناجمة عن تغير وتدهور المواد وتحليلها.



الشكل (4-48) مخطط يوضح المنهجية المستخدمة لدراسة الأضرار الناجمة عن ضعف المتانة

4-4-1- التأثيرات الخارجية (Action)

برزت أهمية الجسور الحجرية القوسية، وكذلك المنشآت الحجرية، على مر السنين حيث أنها إضافة إلى إظهار قدرتها الكبيرة على الانسجام مع البيئة الطبيعية المحيطة فقد أظهرت قدرتها على التكيف مع تغيرات البيئة والتغيرات المحيطية نتيجة الاستخدام. أبدت هذه المنشآت متانة جيدة جداً على الرغم من قلة صيانتها واستمرت في حالة جيدة لسنوات عديدة على الرغم من تعرضها للعوامل الخارجية. لذلك يجب أخذ الإجراءات بسيطة التأثير والمطبقة بشكل دائم على الجسر بعين الاعتبار، إذ قد تؤثر على استقرار الجسر. تم تصنيف التأثيرات وفقاً لطبيعتها كما في الشكل (4-49).



الشكل (4-49) تصنيف التأثيرات

4-4-1-1- التأثير البيئي (Environmental Action)

تتفاعل التأثيرات البيئية بشكل مستمر مع المنشأ. فمن الممكن أن نميز بين التأثيرات الناتجة عن المناخ (التأثيرات المناخية:Climatic Action) والتأثيرات الناتجة عن ملوثات البيئة (التأثيرات بسبب التلوث:Pollution Action).

في الجسور الحجرية بشكل عام لا تعتبر التأثيرات الناتجة عن التلوث هامة مقارنةً بالتأثيرات المناخية، ما عدا حالة الجسور الواقعة في منطقة مدنية أوضاحية (محاطة بمصنع، نهر ملوث، الخ).

أ- التأثير المناخي (Climatic Action)

تتمتع دول الاتحاد الدولي للسكك الحديدية (**UIC: Union Internationale** des **C**hemins de fer) بشكل عام بمجال مناخي واسع. لذلك يوجد أنواع عديدة من التأثيرات المناخية قد تسبب التدهور تبعاً لنوع الحجر المستخدم والشروط المحلية.

التأثيرات المناخية الرئيسية هي: الحرارة، الماء، الهواء، الجليد.

- **الحرارة (Temperature):** تُعتبَر التغيرات الحرارية سبباً للظواهر الهامة مثل التجوية (الحت) الميكانيكية والكيميائية.
- **الماء (Water):** يشكل الماء وتغير الرطوبة سبباً أساسياً لتدهور الحجر. تتمثل تأثيراته بجرف المواد، انحلال الإسمنت الداخلي، تميه الأملاح (انحلالها بالماء)، تشبُّع الحجر بثاني أكسيد الكربون، الخ. قد يتصاعد الماء نحو الأعلى بفعل العمل الشعري وتبدأ عملية التدهور في الأجزاء السفلية للركائز وجسم القوس. يدخل تأثير الماء في معظم ظواهر تدهور الحجر الكيميائية والميكانيكية، ويعتبر المطر مصدراً للماء الذي قد يسبب ضرراً خطيراً.
- **الرياح (Wind):** يظهر تأثير الرياح والجزيئات التي يحملها على سطح الجسر ويتعلق بطبيعة كل من المادتين (المواد التي تحملها الرياح ومواد المنشأ) وطريقة تعرضها للمنشأ.
- **الجليد (Ice):** تسبب دورات التجمد-الذوبان تدهور ميكانيكي هام للمواد وتؤدي لتشكيل مسامات صغيرة. الشكل (4-51).

الشكل (4-50) تأثير الجليد على الجسر

ب- التأثيرات الناتجة عن التلوث (Pollution Action)

من المهم أن نؤكد أن معظم مسببات التلوث هي عناصر طبيعية موجودة في الغلاف الجوي. ينتج التلوث عن تغير تركيز العناصر و يُعتبر غاز ثاني أكسيد النتروجين (NO_2) ذو مصدر يسببه الإنسان.

هناك عوامل عديدة للتلوث موجودة في الغلاف الجوي، مثل غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO2)،غاز النتروجين (NO)، غاز الأوزون (O_2)، الهيدروكربونات (HC) والجزيئات المحمولة في الرياح.

من الصعب جداً تحديد الضرر الفعلي الذي تسببه هذه العناصر على المنشأ الحجري ومعرفة مستوى تدهور الحجر الحاصل وسرعة هذا التدهور. تتمثل التأثيرات الرئيسية للتلوث على الجسور الحجرية القوسية بترسب الجزيئات على السطح إضافة إلى التأثيرات الكيميائية.

يمكن أن يشكل أكسيد الكبريت وأكسيد النيتروجين أحماض قوية (حمض الكبريتيك والنتريك) عندما يتم جمعها مع الماء (الماء الحمضي). قد يُحوِّل الماء كيميائياً بعض أنواع الحجر (مثل الحجر مع السيليكات أو الطين) ويمكن لهذه التعديلات الكيميائية أن تسبب ذوبان الملح في الماء (الكبريتات والكربونات) لتترسب على السطح. إن تبلور الملح

(والمستمد من ترسب الملح) هو تأثير ميكانيكي جديد على الحجر والذي قد يؤدي لضـــرر كبير.

4-4-1-2- التأثيرات البيولوجية (Biological Action)

يشمل هذا التصنيف التأثيرات العضوية مثل البكتيريا والفطور، الأشنيات، حشـــائش الماء والطحالب والنباتات بشكل عام. يكون هذا التأثير عادةً أكثر ضرراً علـــى المنشـــآت الحجرية مثل واجهات المباني الأثرية الهامة. ترتبط الأضرار بالتدهور السطحي الناتج عن التغيرات الكيميائية للحجر أو على سطحه الخارجي.

البكتيريا والفطور: تؤدي دورة حياة بعض أنواع البكتيريا إلى تشكيل الأحمـــاض. تتمثـــل الأضرار المرتبطة عادة بهذا النوع من التأثير بتشكُّل الكبريتات والقشور السوداء. كما في الشكل (4-52).

في حالة نترجة البكتيريا، يتآكل الحجر بفعل حمض النيتريك دون أن يشـــكل الكبريـــت أو قشور سوداء. والضرر المرتبط بهذه الحالة هو تدهور السطح على الرغم من بقـــاء آليـــة التدهور بطبيعة كيميائية. بشكل عام، تولد أنواع أخرى من البكتيريا والفطريات أحمـــاض عضوية وتترك آثار ضارة على مواد الحجر مع مرور الوقت وتساهم في تطوير عمليات التدهور الكيميائي.

الأشنيات: تنتشر الأشنيات بشكل شائع على السطوح الحجرية القديمة. يسبب وجودها غالباً تحلُّل الطبقة الخارجية للحجر حتى عمق عدة ميليمترات. يحدُث هذا التحلل بسبب حمـــض الأوكساليك الناتج والذي قد يسبب أوكسالات الكالسيوم وبالتالي تشكُّل البقع.

عادة، يكون نمو الأشنة بطيئاً ولا يوجد رأي واضح إذا كان من الأفضل تـــرك أو إزالـــة الأشنيات، إذ إنه وعلى الرغم من تحلل طبقة الحجر الخارجية، تصبح الأشـــنيات عنصـــر حماية حيث تشكل طبقة واقية ضد الرطوبة والماء ويظهر ذلك بالشكل (4-52).

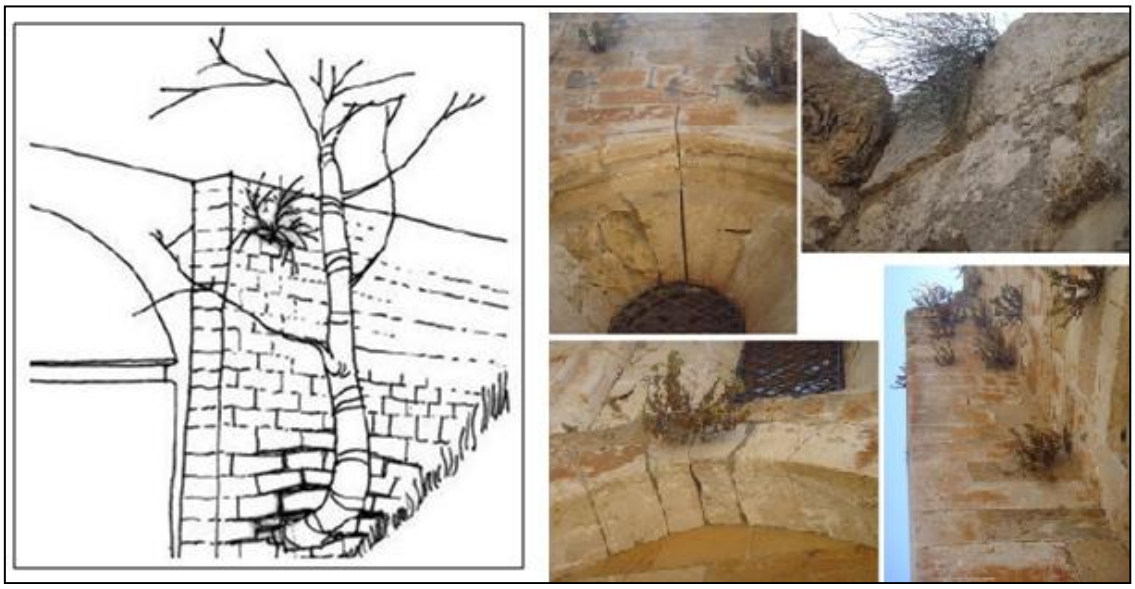
الشكل (4-51) تشكل القشور السوداء على الحجر

الشكل (4-52) تشكل الأشنيات على السطح الخارجي للحجر

<u>أعشاب الماء والطحالب</u>: سبب تصنيف هذين العنصرين معاً هو أنهما يملكان قاسم مشترك وهو الظروف الرطبة اللازمة للنمو. وبعكس عشبة الماء التي بالكاد تسبب تدهور السطح الخارجي للحجر، تسبب الطحالب في الوسط القلوي (في الملاط الكلسي أو الإسمنت) تحلل السطح بعمق ميليمتر واحد.

الشكل (4-53) تحلل السطح الخارجي للحجر

<u>النباتات</u>: تقوم جذور النباتات بالضغط على الحجر وتسبب تشققه. إضافة لذلك، يمكن لهذا الضرر المرتبط مع الظواهر الميكانيكية أن يؤدي إلى تدهور العمليات الكيميائية.

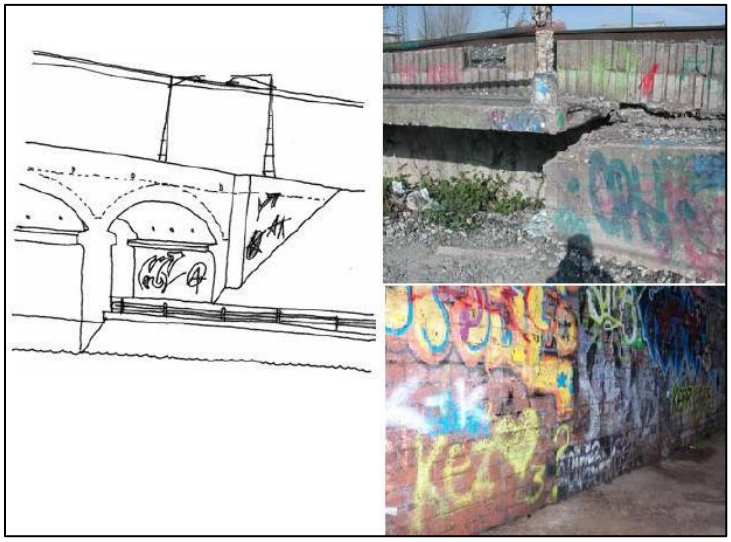


الشكل (4–54) الأضرار التي يسببها نمو النباتات على الجسر

4–4–1–3– التأثيرات البشرية (Human Action)

تم تصنيف التأثيرات التي يسببها الإنسان ضمن ثلاث مجموعات: الأعمال التخريبية، الحوادث والتدخلات السابقة.

الأعمال التخريبية: تتضمن الكتابة على الجدران أو الحرق المتعمد الذي يؤثر عادة على سطح الحجر. تفسد الكتابة على الجدران المظهرالخارجي للمنشأ فقط. أما في حالة الاحتراق، يتوقف الضرر على مدة وشدة الحريق ونوع الحجر. ويؤثر عادة على الطبقة الخارجية للحجر. الشكل (4–55).



الشكل (4–55) أمثلة عن التخريب

الحـــوادث: من الشائع إيجاد أضرار ناجمة عن اصطدام المركبات بالمنشأ. عادة، تحصـــل هذه الحوادث بسبب سوء نظافة الطريق المار تحت الجسر، وتكون نتيجتها تدهور العناصر الإنشائية الرئيسية للجسر.

التدخلات السابقة: أحياناً قد تسبب التدخلات السابقة تدهوراً كبيراً. قد تكون هذه التدخلات عبارة عن أعمال لتحديث الطريق (كهرباء السكك الحديدية) أو إصلاحات أخرى. إن عدم معرفة السبب الرئيسي للضرر المراد إصلاحه، وعدم معرفة التوافق بين المـــواد الحاليـــة والجديدة، قد تسبب أضرار إضافية أو زيادة سرعة الأضرار الحالية.

4-4-2- المواد

يعتبر الحجر مادة مركبة يحكم سلوكه خصائص مكوناته وترابطها. ومن المهم معرفة أن الحجر مادة قوية متباينة الخواص، ويرجع ذلك إلـــى اخـــتلاف الخـــواص الجوهريـــة (مستويات الضعف) كما أن وجود المفاصل الشاقولية والأفقية لا يؤثر فقط علـــى الســـلوك الميكانيكي، بل أيضاً على المتانة.

تستخدم المواد التالية للمنشآت الحجرية بشل رئيسي: الأجزاء/القطع، الحجـــر المنحـــوت، الملاط. وفي بعض الحالات لا يوجد ملاط ويكون الاحتكاك مباشراً بين سطوح العناصر.

4-4-2-1- الأجزاء/القطع

يتم تصنيف القطع كحجر منحوت أو آجر. وتختلـــف الأبعـــاد المســـتخدمة لهـــذه العناصر. قطع الحجر المنحوت تكون أكبر، وعادة ما تكون ذات أبعاد متساوية الحجـــم أو بالنسبة (3/1/1) كحد أقصى. على عكس ذلك، قطع الآجر صـــغيرة وذات نســـبة أبعـــاد تقريبية (8/4/2). هذا الاختلاف في الشكل والحجم يؤثر على السلوك الميكانيكي للعناصر كما تبين في العديد من الدراسات ولكنه يؤثر أيضاً على متانة الحجر.

إن وجود عدد أكبر من المفاصل في البناء الحجري يؤدي لتشكل عدد كبيـــر مـــن نقـــاط الضعف، ولكنه يوفر أيضاً مساراً أسرع وأسهل لتصريف الماء. إضافة لذلك، وبشكل عام، تعتبر متانة الحجر المنحوت أفضل من متانة الآجر (ما عدا بعض الحالات الاستثنائية مثل الحجر المسامي الرملي أو الكلسي). يضم الجدول (4-2) بعض معلومات عن الحجر.

الجدول (4-2) قيم الوزن النوعي للحجر وفق بعض المراجع

نوع الحجر	Ira Baker أدنى- وسطي ـ أعلى	Camuñas وسطي	Hütte أدنى-أعلى	Arredondo أدنى-أعلى	PIET	UIC أدنى-أعلى
غرانيت	28-26-25	28	27-23	27-26	26-30	26-28
حجر كلسي	27-25-23	23	28-24	28-24	20	26-20
حجر رملي	24-22-19	23	27-19	29-23	-	-
رخام	28-27-25	27	28-19	28-27	-	-

نمط/نوعية الآجر	UIC	جسور حجرية
1	آجر ناعم 19-17	نوعية سيئة 14
2	آجر متوسط 21-19	نوعية متوسطة 18-14
3	آجر خشن 22-20	نوعية جيدة 18-14
4	آجر قاسي جداً 23-21	نوعية ممتازة 22-18

4-4-2-2- الحجر المنحوت

يمكن تصنيفها وفق مصدرها إلى: الرسوبية، البركانية أو المتحولة. تضم مجموعة الصخور الرسوبية كل من الحجر الرملي والحجر الكلسي. تضم مجموعة الصخور البركانية البازلت والصخور الحمضية مثل الجرانيت. وتشمل الأحجار المتحولة الكوارتز، النيس والرخام.

على الرغم من استخدام جميع أنواع الحجر المذكورة لبناء الجسور القوسية إلا أن الأحجار الأكثر شيوعاً هي الغرانيت، الحجر الرملي والحجر الكلسي وتستخدم بسبب خصائصها الميكانيكية وتوفرها وأدائها.

أ- **الغرانيت:** وهو حبيبات خشنة جوفية. يتكون الغرانيت من معادن خفيفة (الكوارتز، الفلسبار القلوي، بيوليت، بلاجيوكلاز والميكا البيضاء.

يعتبر الغرانيت ذو عناصر حبيبية مرتبطة مع بعضها البعض دون وجود فراغات فيما بينها. يستخدم عادةً الغرانيت البلوري في الأقواس الحجرية إذ يصنف ضمن الصخور ذات المسامية المنخفضة، إلا إذا احتوت على تشققات صغيرة أو تغيرت نتيجة النشاط البركاني أو تجوية الصخور.

إن الأداء الميكانيكي العالي للغرانيت (أكبر قوة ضغط، معامل المرونة، الخ.)، السهولة النسبية في الحصول على الحجر المنحوت منه، متانته (التي تعود لعدم وجود المسامية) وطبيعته المعدنية تجعل منه حجراً مثالياً لاستخدامه في البناء. الجودة العالية لمادة البناء هذه تجعل استخدامها يمتد إلى مناطق بعيدة عن مكان تشكلها الجيولوجي.

الضرر الأكثر شيوعاً لهذا النوع من الصخور هو قشر الطبقة الخارجية بمقدار عدة ميليمترات بسبب التأثير الملحي الذي يؤثر على الصخر ويحوله إلى رمل.

ب- الحجر الرملي: يصنف الحجر الرملي من الصخور الرسوبية التي تغلب عليها الصخور المرتبطة بواسطة إسمنت كيميائياً أو يسيطر فيها صخر بلوري مكون من كتل بلورية. يتكون الحجر الرملي بنسبة غالبة من الكوارتز والفلسبار مع أجزاء من معادن السيليكا، مينيرالات المعدن أو الكالسيت. تعتمد خصائص ومسامية الحجر الرملي بشكل أساسي على نوع الاسمنت وتمتلك هذه الصخور مسامية عالية. تتعلق حساسيتها لتأثير الملح أو التجميد بحجم وشكل المسام. يؤثر وجود الطين على التغييرات المحتملة، على سبيل المثال عندما تحوي الأرض مواد قوامها مسحوق يسبب وجود الماء فيها بعض عمليات التدهور.

ت- الحجر الكلسي: يُصنَّف الحجر الكلسي من الصخور الرسوبية التي تتشكل كيميائياً، بيولوجياً أو ميكانيكياً. هذا النوع هو الأكثر شيوعاً في بناء الجسور الحجرية القوسية نظراً لسهولة استخدامه (بسبب صلابته الملائمة) وسلوكه الميكانيكي الجيد. يحتوي الحجر الكسلي على نسبة عالية من كربونات الكالسيوم إما الكالسيت أو الأراجونيت.

تتكون الأجزاء الرئيسية للحجر الكلسي من الشعب المرجانية أو المستحاثات. ويمكن أن تكون الحبيبات بين المواد مصفوفة بشكل حبيبات صغيرة جداً من الحجر الكلسي الطيني أو حبيبات سميكة من إسمنت الكالسيت.

يتدهور الحجر الكلسي عادةً بسبب تغير التركيب الكيميائي الناتج عن الأحماض مثل انحلال كربونات الكالسيوم (المكون الرئيسي للحجر الكلسي) في ثاني أكسيد الكبريت، فيتشكل حمض الكبريت ويترسب الجبس (SO_4Ca+H_2O) وينطلق غاز ثاني أكسيد الكربون. إضافة إلى ذلك، يتوافق الجبس الناتج مع مراحل الهدرجة المختلفة، ويمكن أن يسبب تأثيراً ميكانيكياً على الصخور. كذلك يؤثر غاز ثاني أكسيد الكربون ويسبب انحلال الحجر الكلسي عندما تتحول كربونات الكالسيوم (غير القابلة للذوبان) إلى بيكربونات (قابلة للذوبان).

4-4-2-3- الملاط

الملاط مادة لدنة تماماً يتصلب خلال ساعات قليلة من تطبيقه ويصبح صلباً في الوقت المناسب. للملاط وظيفتين رئيسيتين في العمل مع الحجر:

- تنظيم وضع البلوك وتوحيد توزع الأحمال.
- المساهمة في توجيه الدفع الأفقي للأساس إذا لزم الأمر.

يتكون الملاط من الرمل، الإسمنت والماء. ينص (De Vekey) أنه يتم الحصول على المستوى الأمثل من المرونة بتحقيق النسبة 3/1 من الإسمنت/الرمل. احتوى الملاط المستخدَم قديماً في بناء أقواس السكك الحديدية على عنصر كلسي (CaO) والذي يتفاعَل مع شوائب أخرى موجودة في الحجر الكلسي لينتج عنه، بتعريضه للحرارة، الكلس الكاوي.

الملاط بشكل عام أضعف عنصر للبناء والأقل صلابة. وهذا هو سبب التشوهات الفورية الكبيرة للأقواس الحجرية والتشوه الكلي. لكن الملاط هو المسؤول عن الانكماش الناتج عن جفاف الحجر ومسؤول أيضاً عن فقدان الماء من الحجر.

وفقاً للدراسات التي أجريت على الجدار الحجرية، ما بين 60 و 80 % من هبوط الجدران (بما في ذلك الهبوط الفوري والتفاضلي) تحدث في الملاط. إذا أخذنا بعين الاعتبار أن سماكة الملاط في البناء الآجري تشكل 15% من السماكة الكلية ومن أجل

البناء الحجري تشكل 2-5%، يشير ذلك أن تشوه الملاط أكبر بكثير من الآجر أو الحجر. وتدل هذه الأرقام على أهمية سلوك الملاط في البناء.

4-4-3- وصف عمليات التدهور والتراجع

قد تسبب التأثيرات السابقة تدهور وتراجع المواد. يمكن تقسيم هذه العمليات من التدهور والتردي في مجموعتين اعتماداً على ما إذا حدثت فيها تغيرات كيميائية أو لم تحدث. تنشأ عملية التحول الكيميائي على سطح الحجر وداخله، أما العمليات دون أي تغير كيميائي تنشأ فقط على سطح الحجر.

4-4-3-1- عمليات التدهور التي لا تغير من التركيب الكيميائي للحجر

وهي التجوية (الحت) الميكانيكية الناتجة عن: تأثير الرياح، تأثير الجليد، تغيرات الطقس، التميه (إضافة الماء)، تبلور الملح، الأضرار الناتجة عن نمو النباتات.

أ- **التجوية الميكانيكية بتأثير الرياح:** تؤثر الجزيئات التي يحملها الهواء على الحجر مسببة التآكل. يتعلق التآكل من جهة بالطاقة الحركية للجزيئات (والتي تعتمد على كتلة الجزيئات وسرعتها)، ومن جهة أخرى بطبيعة المادة التي تؤثر عليها الجزيئات. يرتبط حجم الجزيئات بسرعة الرياح المتغيرة وفق المناخ ومكان وجود الجسر.

التأثير الأكثر شيوعاً هو تضرر السطح وحدوث الثقوب. ومن المهم أن نشير إلى أن للرياح وتبلور الملح ذو قدرة كبيرة على التدمير.

ب- **التجوية الميكانيكية بتأثير الجليد:** يُمتص الماء في مسام وشقوق الحجر، وعندما يتجمد هذا الماء يشكل قوة تدميرية كبيرة جداً إذ إنه عند تجمده يزداد حجم المياه بنسبة تصل إلى 9 % ويترافق مع زيادة في الضغط إلى (100) ميجا باسكال. هذه الزيادة في الحجم قد تسبب تشقق يمكن أن يؤدي إلى تفكك الحجر. يكون هذا التأثير أكبر إذا انخفضت درجة الحرارة بشكل مفاجئ إلى ما دون درجة التجمد.

ت- **التجوية الميكانيكية الناتجة عن تغيرات الطقس:** يمكن أن تسبب التغيرات في درجة الحرارة ضرراً مفاجئاً مع انفصال وفقدان الطبقات السطحية من الحجر. يمكن تفسير هذه الظاهرة أن انخفاض حرارة المادة يجعل طبقات السطح الخارجي للأحجار تخضع لدرجات حرارة أعلى من الجزء الداخلي وهذا يسبب تمدد تفاضلي في الحجر الذي يولد

إجهادات عرضية، وعندما يتجاوز هذا الضغط الحد الأعظمي للإجهاد العرضي للمادة قد يسبب انقسامها.

ث- التجوية الميكانيكية الناتجة عن التميه (إضافة الماء): تنتج هذه الظاهرة عن التغييرات في مستوى تشبع الحجر. يدخل الماء إلى الحجر من خلال المسام والشقوق بتأثير العمل الشعري مما يسبب زيادة في كثافة الحجر. إذا احتوت المسامات أو الشقوق على الطين، أو كان الحجر مصنوعاً من مواد طينية، سيزداد حجم التشققات بتأثير القوى المتولدة بين طبقتي طين متجاورتين.

ج- **التجوية الميكانيكية الناتجة عن تبلور الملح:** تؤثر الأملاح الذائبة تأثيراً مزدوجاً على الحجر. من ناحية تسبب تدهوراً كيميائياً عند رد فعل مكوناتها، ومن ناحية أخرى، وهي الأهم، يسبب تبلور الأملاح الذائبة تجوية ميكانيكية نتيجة عمليات التوسع التي تحدث داخل المسام. تحدث ظاهرة العمل الشعري للماء عندما تتبلور الأملاح الذائبة الموجودة في مسام الحجر وعندما يتبخر الماء. إذا تبخر الماء ببطء ولم يكن مستوى الرطوبة الخارجية بالنسبة للحجر منخفضاً جداً فإنه يسبب التزهر وتشكل قشور أو بقع على السطح (تدهور سطحي) كما بالشكل (4-56) وذلك حسب طبيعة الأملاح.

الشكل (4-56) مثال عن تدهور جسم القوس

المتغيرات الرئيسية في ظاهرة التدهور هي حجم وشكل المسام، على غرار التدهور الناتج عن عملية التجمد-الذوبان. المسام الكبيرة جداً تسمح بحدوث البلورة، كما تسمح المسام بعدة حالات بحدوث الهدرجة. الجدران الحاوية على مسامات تشبه المناخل لكنها غير مملوئة بالبلورات وبالتالي لا تولد إجهادات. وتتأثر فقط بتباعد المسام.

ح-**الأضرار الناتجة عن نمو النباتات:** قد يكون التأثير الميكانيكي للجذور ضاراً جداً على العناصر الإنشائية للجسور الحجرية القوسية، والتي يمكن تغطيتها بجميع أنواع الأشجار والشجيرات. يمكن أن تسبب جذور النباتات تشقق الحجر وانتقاله، أو حتى فقدانه من الجسر.

الشكل (4-57) الأضرار الناتجة عن نمو النباتات

4-4-3-2- عمليات التدهور التي يمكن أن تغير من التركيب الكيميائي لمواد البناء:

تتميز هذه العمليات برد الفعل الذي يحكم التغيرات الكيميائية، والذي يعتمد على تشكيل المعادن، تدفق المياه وكذلك على الجسيمات في المحلول. الماء هو العنصر الأكثر أهمية والمرتبط بالتدهور الكيميائي لمواد البناء عندما يكون الماء مذيباً. هذه العمليات هي التجوية الناتجة عن: انحلال العناصر، التحول إلى كربونات، سحق الطين.

أ- **التجوية الناتجة عن انحلال العناصر:** وهي أهم ظاهرة كيميائية لأنها تؤثر على جميع أنواع الحجر تقريباً (انحلال الكربونات، إسمنت الحجر الرملي، الجبس، الخ). إذ تستطيع مياه الأمطار حل (CO_2) في الغلاف الجوي مشكِّلة حمض الكربونيك وهذا يزيد من مستوى الحمض في الغلاف الجوي ومن قدرة الماء على إذابة كربونات الكالسيوم

(التي تستخدم عادة مثل إسمنت الحجر الرملي)، وتحوله إلى بيكربونات الكالسيوم القابلة للذوبان.

ب- **التجوية الناتجة عن التحول إلى كربونات:** لا تعتبر الظواهر المرتبطة بالكربونات خطيرة عادةً لكنها يمكن أن تكون دليلاً على وجود ظواهر أخرى أكثر ضرراً.

المكون الرئيسي للحجر الكلسي والحجر الرملي مع الإسمنت الكلسي هو كربونات الكالسيوم (الكالسيت)، وبالتالي هي المرجحة لتطوير هذه الظاهرة. في هذه العملية، من الضروري تحليل التفاعلات الكيميائية الثلاث التي تحدث. يجب أن تكون ردود الأفعال بحالة توازن.

ت- **التجوية الناتجة عن سحق الطين:** إن مزج الطين في مصفوفة من الحجر الرملي يرجع إلى الخصائص القطبية للطين والماء. تستطيع جزيئات الماء إيجاد طريقها بين طبقات الطين مسببة انفصالها. هذا التأثير يساهم في انهيار الحجر إنشائياً كما أن وجود الطين مهم لانسجام الحجر.

4-4-4- الأضرار الناتجة

تم وصف الأضرار الموجودة في الجسور الحجرية القوسية ووصف تأثيرات المواد وعمليات التدهور الحاصلة على الحجر. وقد صنفت ضمن أربعة مجموعات رئيسية اعتماداً على عمق وأهمية الضرر كالتالي:

- التغيرات السطحية وتشمل البقع، الطحالب-الأشنيات-نمو الفطور، التزهر، القشور والرواسب السطحية،التجوية السطحية التفاضلية، الثقوب.
- فقدان المواد أي مواد المفاصل والحجر.
- القصور أو الانفصال ويشمل ضرر النباتات والتجوية بتأثير الشمس.
- أضرار ناتجة عن تأثير الإنسان وتشمل التخريب (الكتابة على الجدران، الحرائق)،الأعمال السابقة، تأثير المركبات.

4-4-4-1- التغيرات السطحية

تؤثر بعض الأضرار السطحية على المظهر الخارجي للبناء. عموماً، لا تسبب هذه الأضرار تغيرات هامة في المنشأ الحجري. قد يكون منشؤها كيميائياً أو ميكانيكياً، وتصنف كما يلي:

أ- **البقع:** وهي طبقات سطحية رقيقة يتم تطورها خلال البناء، وتنتج عن العمر الطبيعي للحجر والتلوث الجوي، الماء، الخ.

البقع الأكثر انتشاراً هي البقع السوداء، والتي تنتج عن امتزاج الكائنات الدقيقة، المواد والجزيئات الناتجة عن الغازات المختلفة أو الملوثات الصلبة الموجودة في الغلاف الجوي. يحدث هذا الضرر في أغلب الأحيان للجسور الموجودة في مناطق ذات رطوبة عالية. كما هي الحال في جسم القوس عند تراكم المياه بسبب عدم كفاءة نظام

التصريف. أما البقع ذات الألوان الأخرى مثل البرتقالي تنتج عن إصـــلاحات ســـابقة (الجص، الملاط، الخ.). الشكل (4–58) و(4–59).

الشكل (4–58) مثال عن حدوث البقع

الشكل (4–59) مثال عن البقع وفقدان مواد الربط بين الحجر

ب– الطحالب، الأشنيات ونمو بعض الفطور: يكون نموها عموماً غير كبيـــر ولـــيس عميقاً جداً ويرتبط بالتأثيرات البيولوجية. الشكل (4–60).

الشكل (4–60) أمثلة عن نمو الطحالب والأشنيات والفطور

يحدث هذا الضرر عادة في المناطق المفضلة لنمو الكائنات الحية الدقيقة.

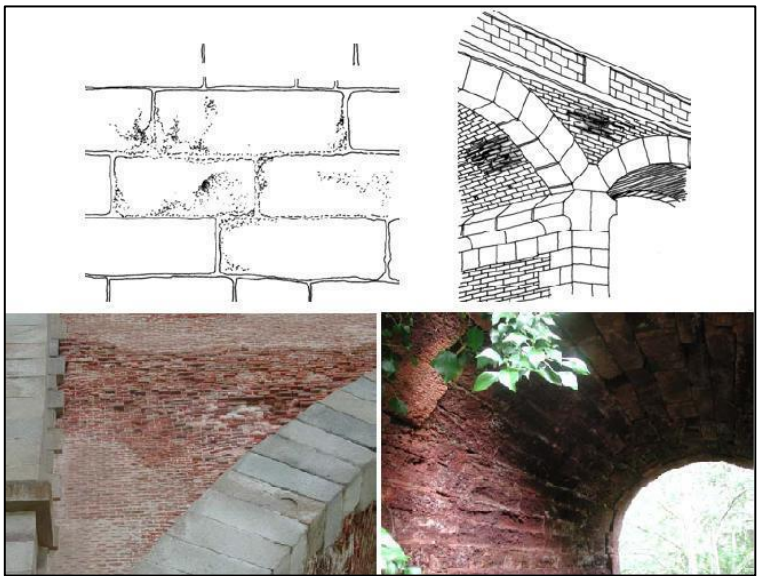
ت- **التزهر والتزهر السري:** وهي نتيجة بلورة الملح. تحدث هذه الظاهرة عندما تتبلور الأملاح الذائبة الموجودة في ثقوب الحجر. فإذا تعرض السطح للتبخر يحدث التزهر، لكن إذا حدث التبخر قبل وصول الملح للسطح يحدث التزهر السري.
يختلف مصدر الأملاح الذائبة، ويمكن أن يكون ذلك بسبب المواد المستخدمة في المداخلات السابقة، أو بسبب مكونات الحجر، العمل الشعري، الخ.

الشكل (4-61) مثال عن التزهر

ث- **القشور والرواسب السطحية:** ترتبط عادةً مع ترسب الكربونات. تتشكل القشور الكربونية بشكل رئيسية من كربونات الكالسيوم الناتجة عن المحلول ومن الملاط، من إسمنت الردم أو من التدخلات السابقة. الشكل (4-62).

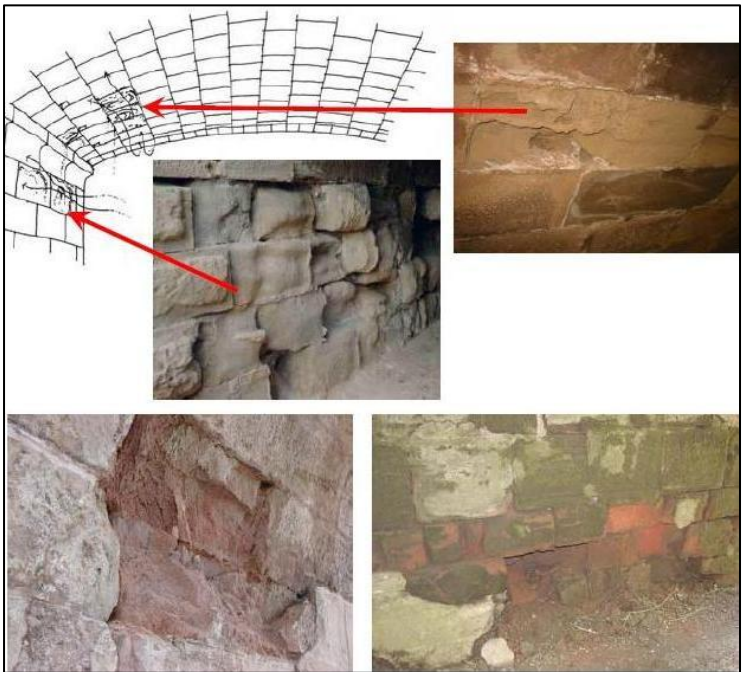
الشكل (4-62) مثال عن تشكل القشور

ج- **التجوية السطحية التفاضلية:** يمكن أن يسبب التدهور التفاضلي مستويات مختلفة من تدهور السطح كنتيجة لاختلاف خصائص المواد المركبة، وكذلك نتيجة لاختلاف تجوية المواد. يبين الشكل (4-63) أمثلة عن هذا النوع من الأضرار.



الشكل (4-63) أمثلة عن تدهور السطح الخارجي

ح- الثقوب: كما ذكرنا سابقاً تتشكل الثقوب نتيجة للميكانيكية المعتادة للتدهور مع تبلـــور الملح وتأثير الرياح. يلاحظ هذا الضرر غالباً في الحجر الحساس لتأثير الملح والمنـــاطق المعرضة للرياح. الشكل (4-64).



الشكل (4-64) أمثلة عن تشكل الفجوات والثقوب

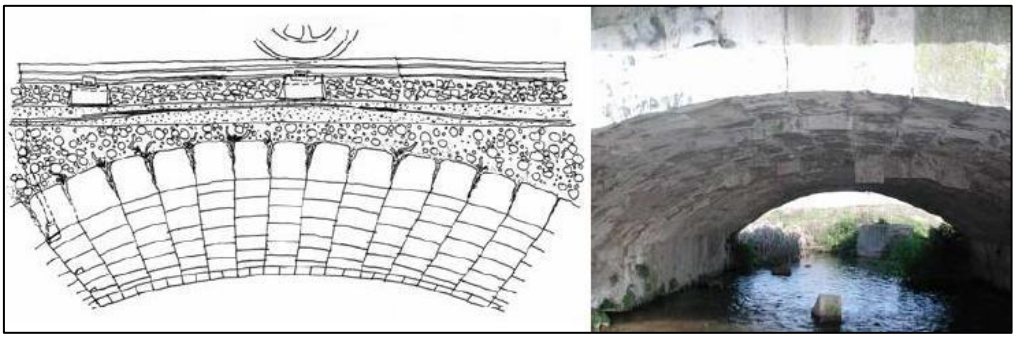
4-4-4-2- فقدان المواد

تشمل هذه المجموعة جميع أنواع الأضرار التي يحدث فيها فقدان المواد نتيجة لعمليات كيميائية وميكانيكية مختلفة. هذه الأضرار أكثر خطورة وعادة ما تكون مؤشراً على وجود عملية تدهور كبيرة. قد تكون هذه العمليات كيميائية، على سبيل المثال انحلال الحجر الرملي أو الحجر الكلسي والذي يسبب التدهور. أو قد تكون العملية ميكانيكية مثل تبلور الملح الذي يسبب التفكك الجزئي وفقدان المادة، أو كليهما كما في حالة تشكل الثقوب، وعادةً تكون ظاهرة التجوية الميكانيكية هي الأكثر ضرراً. يمكن تصنيفها بالشكل التالي:

فقدان المواد: المفاصل والقطع: من الممكن أن تفقد مواد المفاصل عند تدفق الماء عبر الملاط، كذلك فقدان الحجر بسبب التأثير المشترك للعمليات الكيميائية والميكانيكية والتي من أجل جسر بحالة تدهور متطورة قد يسبب تدمير كامل للحجر. الشكل (4-59).

قد تكون الأسباب كيميائية أو ميكانيكية كما هو موضح أعلاه. أحياناً، إذا كان الضرر المحلي عند تاج جسم القوس، قد يكون الضرر نتيجة لتأثير تطبيق الأحمال الحية على القوس. يمكن أن يحدث هذا الضرر للحجارة المتساقطة. تبين الأشكال (4-65) و(4-66) أمثلة متعددة عن هذا النوع من الضرر.

الشكل (4-65) الأضرار الناتجة عن فقدان مواد الربط والحجر

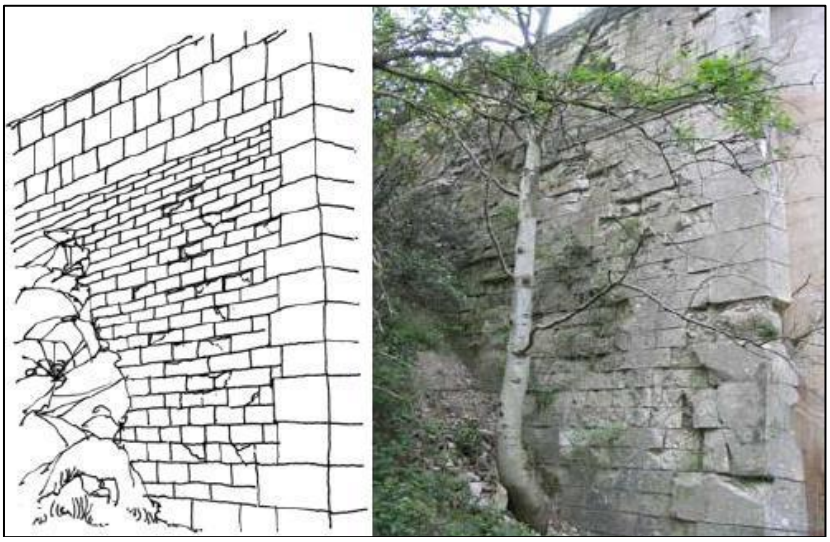


الشكل (4-66) أمثلة عن تساقط قطع الحجر

4-4-4-3- القصور أو الانفصال (ضرر النباتات والتجوية بتأثير الشمس)

تضم هذه المجموعة الفجوات ويتم تصنيفها كما يلي:

أ- **التشققات:** تنشأ عادة عن نمو النباتات كما هو موضح بالشكل (4-54).



الشكل (4-67) أمثلة عن التشققات الناتجة عن الحركات التفاضلية

ب- **التصفيح:** يحدث التباعد في الحجر بشكل موازي لسطحه. وهو يشمل أجزاء الحجر المنفصلة ذات الأشكال والأحجام المختلفة. تظهر التشققات غالباً على السطح بسبب الحركات التفاضلية الناتجة عن أشعة الشمس (والتي تسبب التجزئة بسبب تكرار دورات التجمد-الذوبان)، تناوب الرطوبة والجفاف، والضغط الناتج عن بلورة وهدرجة الأملاح المتراكمة تحت سطح الحجر.

4-4-4-4- الأضرار الناتجة عن تأثير الانسان

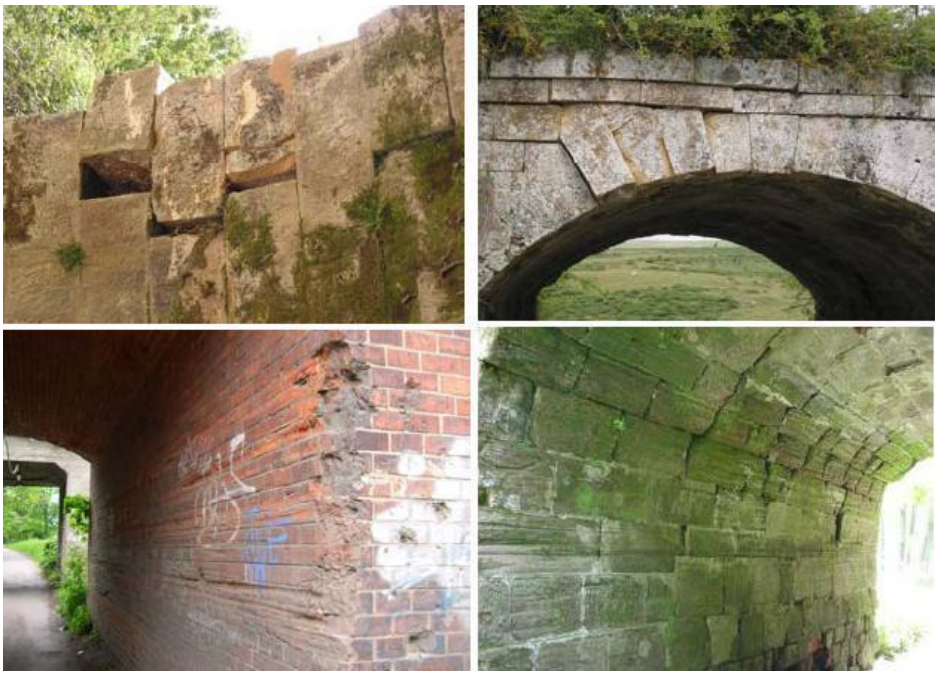
يمكن تصنيف الأضرار الناجمة مباشرة عن عمل الإنسان كالتالي:

أ- **أعمال التخريب:** الحرائق، الكتابات على الجدران والضرر المتعمد. وعادة مثل هذه الأضرار ليست خطيرة وتؤثر على سطح الخارجي للجسر فقط؛ الشكل (4-55).

ب- **التدخلات السابقة:** الأضرار الناجمة عن الأعمال السابقة التي لم تؤخذ بعين الاعتبار على المدى الطويل والتي تؤثر على عمل المنشأ. بعض من هذه الأضرار تنتج عن تحديث الطريق.

الشكل (4–68) أمثلة عن الأضرار الناجمة عن استخدام الملاط الاسمنتي بدلاً من الكلسي

ت– الآثار: هذا هو المصطلح المستخدم للدلالة على الخدش، الحفر وانتقالات الحجر الناجمة عن تأثير السيارات على الجسور الحجرية القوسية، كما عندما يكون ارتفاع العربة أكبر من ارتفاع القوس، أو عدم مرور العربة من محور الطريق حتى تمر تحت الجسر بأمان.



الشكل (4–69) الضرر الناجم عن تأثير صدم العربات

الفصل الخامس: معاينة الجسر وتقييم حالته الراهنة

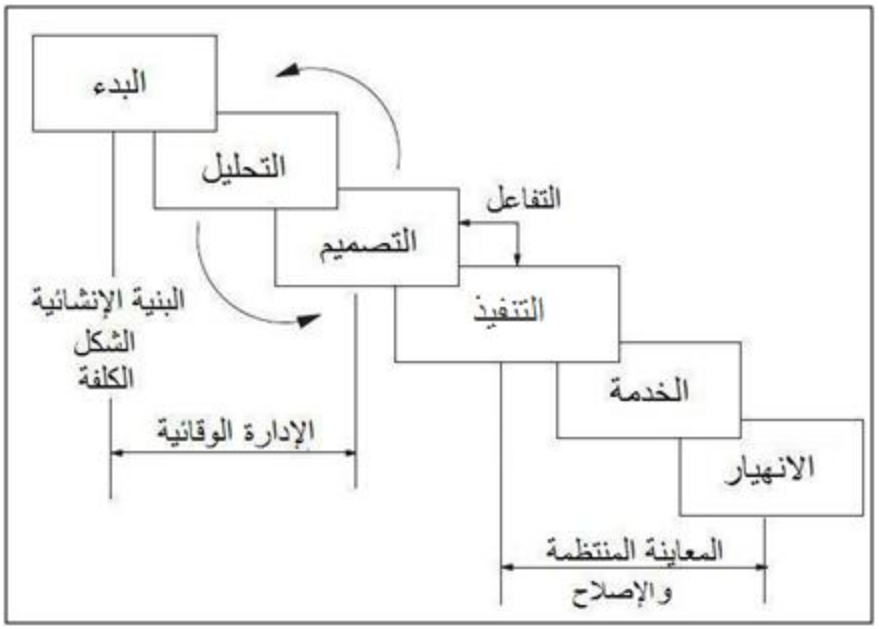
5-1-مقدمة (Ryall, Mike. 2001) [25]

يوجد في سوريا حوالي /1000/ جسر، أكثر من 60% من هذه الجسور هي جسور حجرية ومعظمها مازال قائماً ولها فائدة كبيرة إذ إنها تخدّم طرقاً رئيسية أو خطوط سكك حديدية. ومن الجدير ذكره أن هذه الجسور قائمة منذ مئات السنين ومع ذلك مازالت قيد الاستخدام وبأضرار قليلة في معظمها بحيث لا تؤثر على أدائها الحالي. لكنها من الناحية العملية تُعتبر غير آمنة بمعنى أن بعضها قد ينهار بشكل مفاجئ دون أن نلاحظ الأعراض عليه وخاصة الجسور الموجودة في المناطق البعيدة عن المناطق المأهولة والتي من الصعب مراقبتها بشكل دائم وهنا تكمن أهمية المعاينة الدورية للجسور إذ نستطيع بذلك معرفة حالة الجسر وأضراره وهذا يمكننا من تحديد قدرة تحمله وعمر الخدمة المتبقي ومنه نقيم حالته الراهنة كما أننا قد نتمكن من معالجة الأضرار في بعض الحالات والوقاية من خطر الانهيار المفاجئ الذي قد يسبب أضرار أكبر مادية أو بشرية.

لتسهيل معاينة الجسور بشكل دوري والحفاظ على النتائج يمكننا أن نلجأ لتطبيق نظام إدارة الجسر **(Ryall, Mike. 2001)** [25] المستخدم في العديد من الدول الأخرى. إن إدارة الجسر هي الوسيلة التي تمكننا من الاعتناء بالجسر منذ تنفيذه وحتى نهاية عمره التصميمي. من المؤسف معرفته أن الكثير من الجهات المعنية والمسؤولة عن الجسور في جميع أنحاء العالم تعلم بأهمية المعاينة والصيانة المنتظمة للجسور خلال فترة خدمتها والحاجة الضرورية لها، لكنها لم تدرك الحاجة إلى التخطيط المسبق في مراحل البداية والتصميم لضمان أن يتم تطبيق المبادئ السليمة التي من شأنها زيادة ديمومة الجسور، وفي حالتنا المتعلقة بالجسور الحجرية القديمة نستطيع استخدام مبادئ إدارة الجسور بحيث تتعلق بإدارة الجسر بعد إنشائه وليس بمرحلة ما قبل التصميم.

إن عملية إدارة جسر ضرورية لتنسيق وتنفيذ المهام المترابطة لرعاية الجسور مثل جمع بيانات متعلقة بالجسر، المعاينة المنتظمة، تقييم حالة الجسر ومقاومته، الترميم، التدعيم، تحديد أولويات تخصيص الأموال (التكاليف) والأهم الحفاظ على السلامة.

يبين الشكل (5-1) المراحل الستة الحرجة في دورة حياة الجسر. يبدأ عمل الإدارة الرئيسية عند وجود جسر مبني، هذا يستدعي تسجيل البيانات الأساسية للجسر بشكل قاعدة بيانات عن طريق جمع وتسجيل المعلومات من خلال عمليات المعاينة من أجل تقييم حالة الجسر ومعدل التدهور. هذه المعلومات وغيرها تستخدم لاحقاً لتقييم القدرة على تحمل الأحمال ومعرفة كيفية ترميمه وتقدير الكلفة المادية.



الشكل (5-1) المراحل الستة الحرجة في دورة حياة الجسر(Ryall, Mike. 2001) [25]

بهدف الحفاظ على هذه المعلومات بشكل منظم يمكننا استخدام مبدأ استمارات موحدة بحيث تحوي معلومات أولية من الضروري معرفتها وتوفرها لكل جسر ثم تُجمَع هذه الاستمارات ضمن ملف واحد. كما يجب إرفاق هذه الاستمارات بمخططات وصور تفصيلية للجسر. يبين الشكل (5-2) نموذج استمارة المعلومات.

الشكل (5-2) نموذج استمارة المعلومات (Ryall, Mike. 2001) [25]

5-2-طرائق المعاينة (Inspection Routines) (Ryall, Mike. 2001) [25]

تُعتَبَر عملية المعاينة التي تجري على الجسور ذات أهمية كبيرة فهي الأساس العملي الذي يسمح بمعرفة الوضع الراهن للجسر، إذ تبدأ عملية التقييم بالفحص الدقيق للجسر وتحليل الملاحظات وهذا ما نسميه المعاينة البصرية (visual inspection)، يلي ذلك إجراء التجارب التي تُستخدَم لمعرفة حالة مواد الجسر ووضعه الإنشائي.

سوف نستعرض الطرائق والخطوات المستخدمة في عملية المعاينة بشكل عام وليس تفصيلي لأن كل جسر يعتبر حالة خاصة وفقاً لشكله وتصميمه وعمره إضافة إلى أن هذه العملية تحتاج إلى قدر كبير من الخبرة والمعرفة التي يحتاجها المهندس الذي يقوم بها وبالتالي بحاجة لمهندسين مختصين والذين من القليل توافرهم.

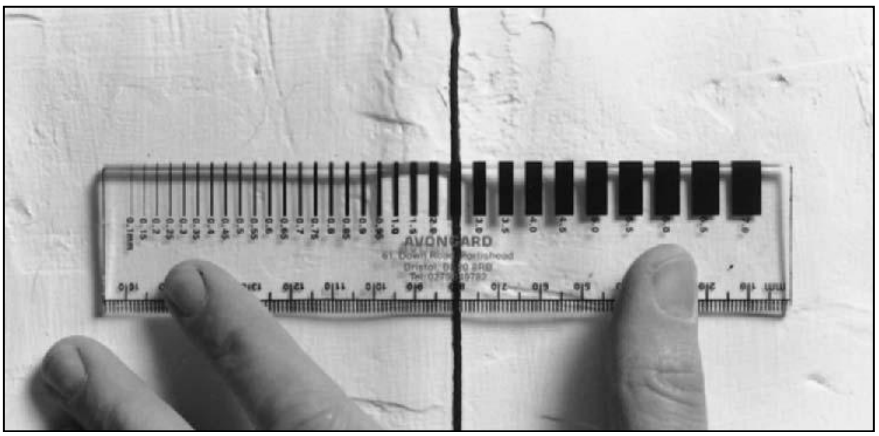
تتلخص خطوات عملية المعاينة كالتالي: طرائق المعاينة البصرية (visual inspection)، التجارب غير التخريبية (Non-destructive testing)، التجارب المخبرية واختبارات التحميل (Load Testing).

5-2-1- طرائق المعاينة البصرية (visual inspection)

من الصعب تحديد خطوات أو مراحل تفصيلية للقيام بعملية المعاينة البصرية بحيث نستطيع تطبيقها على جميع الجسور، لذلك يمكن اللجوء إلى إيجاد طريقة تسلسلية لإجـراء المعاينة البصرية الدورية بحيث نستفيد من جميـع المعلومـات المتـوفرة عـن الجسـر (المخططات، الحسابات التصميم، تقارير دراسة التربة، الخ).

يمكن اعتماد التسلسل التالي في عملية المعاينة:

5-2-1-1- معاينة تشققات بلاطة الجسر (cracking in the bridge slab inspection)

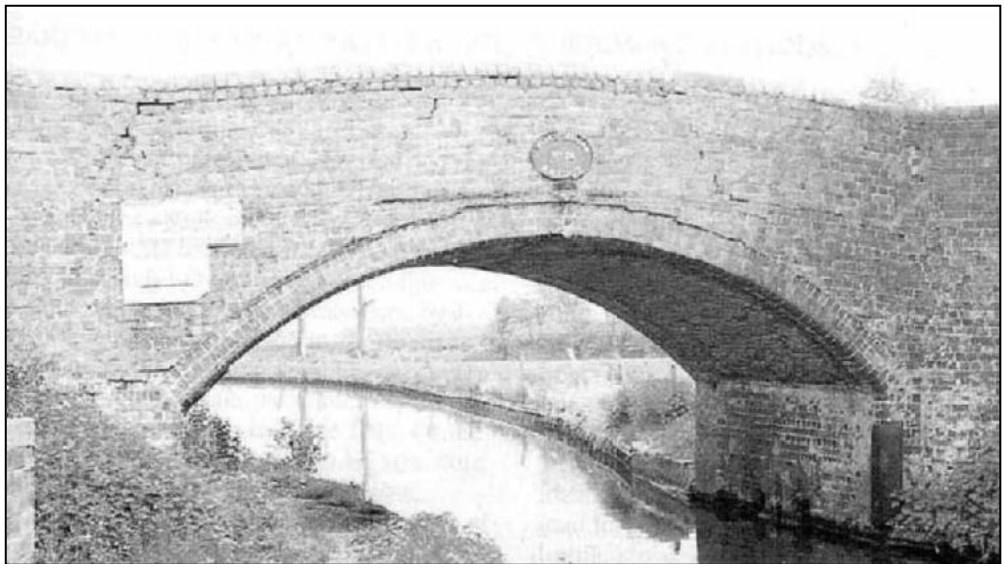


الشكل (5-3) قياس التشققات في بلاطة الجسر باستخدام مسطرة القياس (0.1 مم-7مم) (Ryall, Mike. 2001) [25]

الشكل (5-4) التشققات في الوجه السفلي لبلاطة الجسر (Ryall, Mike. 2001) [25]

5-2-1-2- معاينة جسم القوس والجدران فوق القوس (Spandrel & Arch Barrel Inspection)

يمكننا ملاحظة التشققات في أطراف جسم القوس بين الحلقات الحجرية والجدار فوق القوس (تسمى غالباً انفصال الحلقة). ترجح الدراسات أنه يدل على تحميل الجسر بحمل زائد. وهو ضرر خطير وجدي لذلك يجب تسجيل موقع وطول وعرض وعمق كل تشقق إن أمكن.



الشكل (5-5) حدوث تشقق بين جسم القوس والجدار فوق القوس (Ryall, Mike. 2001) [25]

5-2-1-3- معاينة الأقواس (Arches Inspection)

يجب الانتباه إلى حدوث تشققات أو انقسامات في القوس، فقد يسبب الثلج مشاكل إذا كان القوس مبنياً من حجر هش أو آجر ضعيف، إذ تتسرب المياه من خلال الثغرات في المفاصل (أو من خلال الحجر نفسه) وإذا تجمد يتمدد الماء ويضغط على الحجر مسبباً انقسامه إلى قطع. على الرغم من أن معظم الجسور الحجرية القديمة تم بناؤها بعوامل أمان كبيرة ما يمكنها من تحمل أحمال المرور الحديثة إلا أنها ليست جيدة كفاية لتحمل الاهتزازات، وهذا يسبب تفكك الحجر وتفتح المفاصل وتشكل التشققات وبالتالي إضعاف القوس. يمكن للاختلافات اليومية والتغيرات الموسمية في درجات الحرارة المحيطة – الأمطار والرياح– أن تضعف المنشأ على نحو خطير بتآكل الحجر تدريجياً.

فالأقواس المصنوعة من حجر طري مثل الحجر الرملي مع فواصل من الملاط الكلسي، يمكن أن تتضرر فتسبب تآكل الطبقة الخارجية من الحجر تاركة فواصل الملاط الكلسي الصلبة في مكانها. كما أن رشح المياه في الشقوق إذا ترافق مع دخول بذور النباتات المحمولة بالهواء فإنها ستنبت، وبالتالي تتوسع الشقوق ويضعف القوس. التشققات السطحية التي تظهر نظراً لتغيرات المناخ لا تكون خطيرة، ولكن يجب التعامل مع التشققات العميقة والواسعة (أكثر من 5mm). يجب تسجيل جميع التشققات وتحديد موقعها، امتدادها وعمقها. يبين الشكل (5–6) و(5–7) أمثلة عن تشقق القوس.

الشكل (5–6) تشقق القوس الشكل (5–7) نمو النباتات بين قطع الحجر

5–2–1–4– معاينة الركائز الوسطية والطرفية (Abutments & Piers (Inspection

يدل وجود التشققات على وجود قوى شد ناتجة عن حركة المرور الكثيفة، الاهتزاز، قصور الأساس، تغيرات درجة الحرارة أو الرطوبة والجفاف.

5–2–2– التجارب غير التخريبية (Non-destructive testing) (Ryall, Mike. 2001) [25]

من الضروري بعد خضوع الجسر للمعاينة البصرية تنفيذ اختبارات غير تخريبية من أجل مواصلة عملية تشخيص الأضرار في حال الاشتباه بضعف الجسر بطرية ما. التجارب غير التخريبية تعني عدم تدمير المنشأ على الرغم من أخذ عينات لاختبارها أو معاينتها في بعض الحالات. يتم إجراء هذه الاختبارات عادةً لتحديد ما يلي:

- نوعية المواد الفيزيائية.
- موقع وامتداد العيوب المخفية، العناصر وحدود المواد.

تُجرى الاختبارات في الموقع لتقديم المزيد من المعلومات التي يستطيع المهندس بواسطتها اتخاذ قرار بطريقة الإصلاح المناسبة.

يتطلب استخدام معظم التجهيزات الخاصة بهذه العملية إلى مهارات خاصة، لذلك يقوم بتنفيذها عادةً أشخاص مدربون. يقوم هؤلاء الأشخاص بتسجيل وكتابة بيانات ونتائج الاختبارات والتي بدورها تستخدم من قبل المهندس المشرف على الجسر الذي يترجمها إلى معلومات مهنية.

5-2-2-1- اختبار المطرقة (Hammer Test)

وهي طريقة تقليدية لاختبار سلامة الأقواس الحجرية من خلال محاولة تحديد مناطق انفصال حلقات القوس. يتم ضرب الحجر بالمطرقة والاستماع للاستجابة الصوتية. الصوت "العميق/الغائر" يدل على احتمال انفصال حلقات القوس، إذ إن أمواج الصوت الميكانيكية لا تنتقل عبر الهواء، صوت "الرنين الصلب" يدل على سلامة حلقات القوس. هذه الطريقة فعالة في حال وجود تباعدات أو فجوات قريبة من السطح الداخلي لكنها لا تحدد دائماً التباعدات ومناطق الانفصال الأعمق.

5-2-2-2-نبضات الرادار (impulse radar)

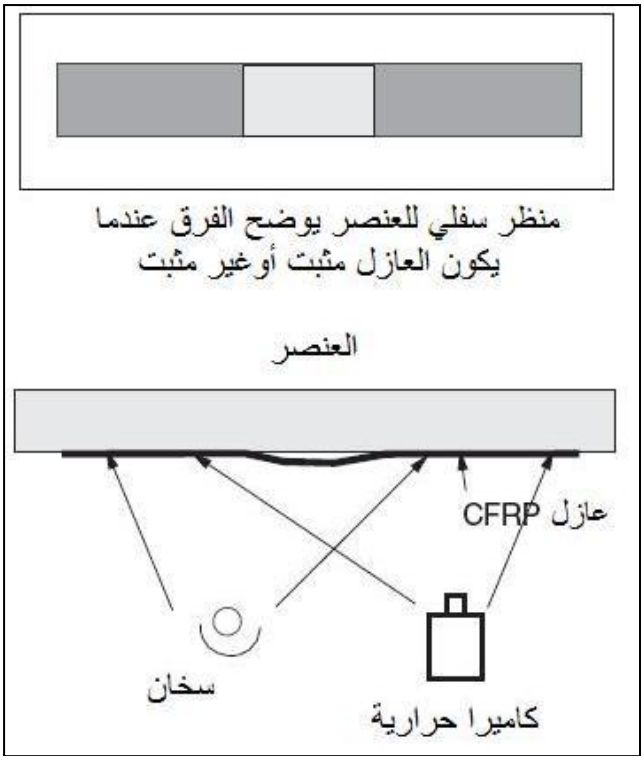
تعتبر هذه الطريقة عملية التطبيق، فهي بالإضافة إلى أنها غير مؤذية بخلاف بعض التجارب الأخرى، يمكننا باستخدامها جمع كمية كبيرة من المعلومات في فترة قصيرة نسبياً من الزمن مع الحد الأدنى من إعاقة حركة المرور وبتكلفة منخفضة نسبياً.

يتم استخدام التسخين الحراري بواسطة الأشعة تحت الحمراء للتحقق من التأثيرات الموضعية عن طريق إعطاء نبضة حرارة لجهة واحدة من عنصر والتي تنتشر عبر العنصر باتجاه السطح المقابل.

تم تصوير منطقة العنصر قيد الدراسة مرة واحدة على الفور بعد الوميض الحراري باستخدام الكاميرا الحرارية، ومرة أخرى بعد فترة زمنية قصيرة حوالي 30 دقيقة. يوضح الشكل (5-8) مبدأ العمل الأساسي.

يجب الاهتمام بالاختبارات غير التخريبية كما يمكن إضافة المعلومات المأخوذة من عملية المعاينة إذ يمكن أن تفيد نتائج الاختبارات في تحديد نوعية مواد البناء بهدف إجراء التقييم. كما أنها قادرة على قياس العيوب المخفية إذ إن الكشف عن وجود أي من هذه العيوب والتي إن لم يتم الكشف عنها قد تتسبب بحدوث الانهيار كما حدث في جسر (Ynys-y-gwas) في انكلترا عندما انهارت فتحة واحدة منه.

وتستخدَم هذه الطريقة أيضاً لاختبار سلامة رابطة الألياف الكربونية المعززة بالبوليميرات (CFRP) والموثوقة مع البيتون، أو المتوضعة على سطحه.



الشكل (5–8) أساسيات التسخين الحراري باستخدام الأشعة تحت الحمراء (Ryall, Mike. 2001) [25]

5–2–3– التجارب المخبرية (اختبارات التحميل) (Load Testing)

إن اختبار حمولة الجسور يكون ذو فائدة كبيرة لمساعدة المهندسين في فهم سلوك الجسور في حالة الاستثمار والحالة الحدية تحت تأثير الأحمال الحية. يتم عادةً بعد بناء جسر ما إجراء اختبار الحمولات الحية لقياس استجابة المنشأ عن طريق استخدام إجهاد مناسب وأجهزة قياس الانتقال.

غالباً ما تنشأ المشكلة في جسر ما إذا بقي في الخدمة مدة أكثر من العمر التصميمي. إذ إنه من الناحية النظرية يعتبر الجسر غير قادر على تحمل الأحمال الخارجية، لكنه من الناحية العملية ما يزال قائماً وقادراً على الخدمة ولا توجد علامات انهيار واضحة تدعو للقلق. ويكمن التساؤل هنا عن قدرة الجسر على الاستمرارية وما هي حاجته للتدعيم؟

طريقة واحدة لمعرفة ذلك هي من خلال تطبيق اختبار الحِمل على القسم العلوي للمنشأ والتحقيق فيه. ويمكن لاختبار الحمل المناسب أن يساعد على التقريب بين المبادئ النظرية والواقع، فهو سريع نسبياً ويمكن نفي بعض الشكوك حول الافتراضات الواردة في التقييم الأولي. هذا النوع من الاختبار إضافي وهو المفضل من قبل معظم المهندسين لأنه ينطوي على تطبيق حمل معلوم على الجسر بحيث لا يتجاوز حمل المرور الحالي وبالتالي يجب أن يكون آمناً دون حدوث ضرر أو خطر انهيار.

توجد ثلاثة أنواع لاختبار الحمل الساكن الممكن استخدامها للأجزاء العلوية للجسر:

- اختبار التحميل الإضافي/التكميلي. (Supplementary load testing)
- اختبار تحميل التحقق. (Proving load testing)
- اختبار حمولة الانهيار. (Collapse load testing)

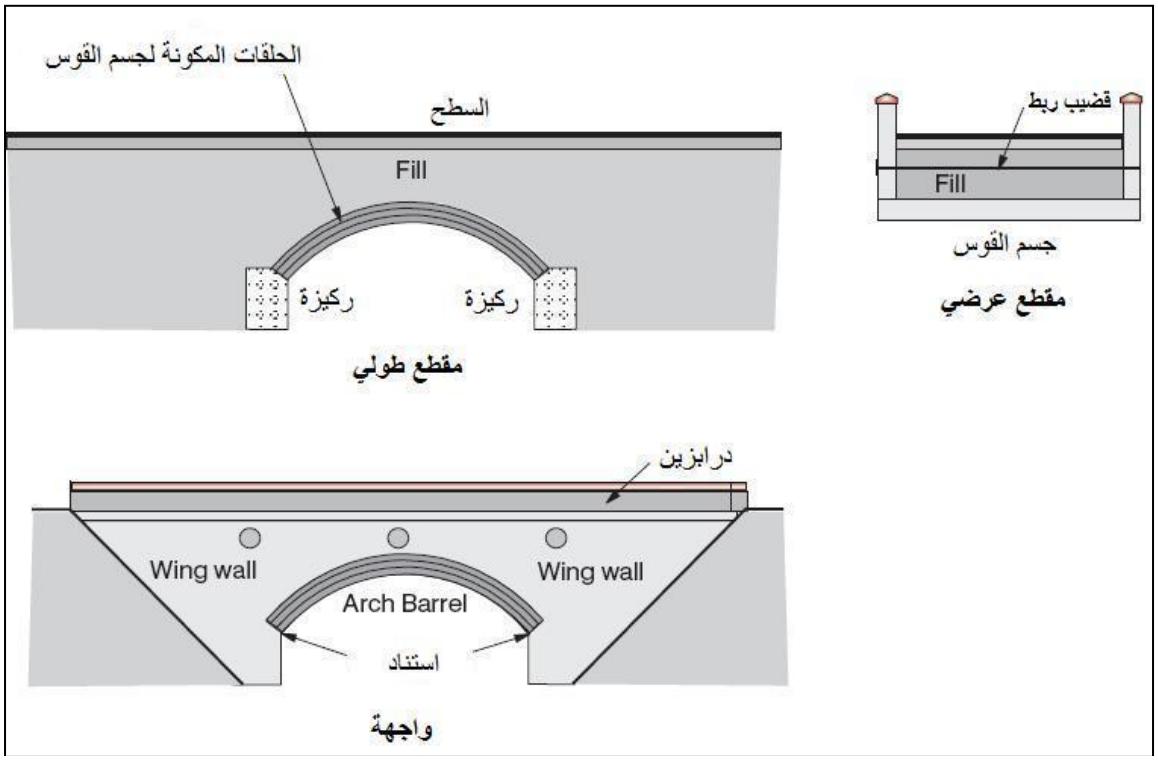
5-2-3-1- اختبارات التحميل الإضافية/التكميلية (Supplementary load testing)

هذا النوع من الاختبار إضافي/مكمل لعملية التقييم، يعتمد على تطبيق حمل معلوم على الجسر بحيث لا يتجاوز حمل المرور الحالي وهذا ما يجعله آمناً دون أن يسبب ضرراً أو خطراً لانهيار الجسر.

يعتمد قرار إجراء اختبار تحميل إضافي على عدة عوامل مثل نمط الجسر وشروطه.

- نمط الجسر: قد تخضع الجسور القوسية لاختبار التحميل من أجل فهم سلوكها تحت تاثير الأحمال المنمذجة وتفشل عادةً بسبب تشكل المفاصل في حلقة القوس وانهيارها. العنصر الإنشائي الرئيسي هو جسم القوس (وهو مكون من حلقات منفصلة من الآجر أو الحجر) والتي تدعم مواد الردم والطريق العلوي. كما أن الركائز الطرفية عند كل نهاية تنقل ردود الأفعال من القوس إلى الأرض. يوضح الشكل (5-9) قوس نموذجي.

• شروط الجسر: عند اتخاذ قرار بإجراء اختبار تحميل لجسر ما فإنه من الضروري والإلزامي القيام بعملية المعاينة البصرية قبل ذلك. فإذا تبين وجود أضـــرار أو عيـــوب أو انزياحات دائمة وكبيرة فإنه من المنطقي عدم المضي بالاختبار وبالتالي لا يمكـــن إجـــراء اختبار التحميل لأن الجسر في هذه الحالة لا يمكنه أن يتحمل تطبيق الأحمال عليه.



الشكل (5-9) شكل القوس النموذجي (Ryall, Mike. 2001) [25]

5-2-3-2- اختبار الحمل التحققي (البرهاني) (Proving load testing)

هذا النوع من الاختبار هو المثالي من وجهة النظر التقييمية لكونه ينطوي على تطبيق الحمولات تدريجياً حتى تصل إلى قيمة تعادل أحمال التقييم المُحدَّدة للحالة الحديـــة، وفـــي بعض الأحيان يُعتَبَر امتداداً لاختبار التحميل الإضافي.

يوجد دائماً احتمال تعرض الجسر لضرر أثناء اختباره. و يمكننا تحديد سلوكه برصـــد استجابة الجسر من خلال قياس الإجهادات والانحرافات. إن أية قيمة عاليـــة أو زيـــادات مفاجئة غير متوقعة أو غير خطية قد تدل على قصور وشيك وبالتالي قد يتوقف الاختبـــار وبذلك يمنع الضرر.

5-2-3-3- اختبار حمولة الانهيار (Collapse load testing)

يتم إجراء هذا الاختبار عادةً على الجسور القديمة التي خرجت عن الخدمة أو على جسور أحدث لكنها تدهورت بعد أن تم إصلاحها. في الواقع، المراحل الأولى للاختبار هي أساساً اختبار تكميلي والميزة الأساسية لكل الاختبارات ليست فقط لرصد حمل وآلية الانهيار بل أيضاً للتمكن من إعادة تحليل النماذج الحاسوبية. هذا قد يعني على سبيل المثال السماح بحركة أو تثبيت الدعامات؛ تعديل النهايات الثابتة للعناصر؛ الأخذ بعين الاعتبار التفاعل بين المنشأ والتربة؛ توزيع الحمولة وغيرها وذلك من أجل النقطة التي تتلاقى عندها القيم المحسوبة مع الأحمال الفعلية المطبقة وقياس التشوهات والانتقالات.

يمكن استخدام الملاحظات المأخوذة عن التشوهات والانتقالات خلال الاختبارات الأخرى وحتى الانهيار لتحديد الحمل الآمن الممكن تطبيقه على جسور مماثلة في اختبار الحمل التحققي دون التسبب بأضرار.

- **تقييم الخطر**

يُعتَبر اختبار الحمل عملية خطرة لذلك من الضروري أن يتم تقييم الخطر بالاستفادة من تقييم المهندسين ذوي الخبرة قبل إجراء الاختبار. يمكن اتخاذ أشكال كثيرة للتقييم، ولكن الهدف من ذلك هو حساب احتمال وقوع حدث معين وتحديد النتائج المحتملة، على سبيل المثال، فقدان المعدات أو حوادث الوفاة. عندها يمكن تقييم الخطر بالصيغة التالية:

الخطر = الاحتمال × النتيجة (*)

إذا كان الخطر قليلاً يمكن قبول الإجراء المتخذ، وإذا كان الخطر كبير يجب البحث عن سبل للحد من المخاطر. وإذا لم يتمكن أحد من إيجاد إجراءات سلامة كافية يجب وضعها بالمكان.

يمكن وضع قائمة لعدم التأكد مماثلة للتالي:

- تحديد الأخطار: مثل الأخطار الكامنة عند تجهيز الجسر؛ نوع القصور المتوقع (متفجر؛ هش أو مطاوع)؛ إمكانية تفاقم الأضرار الحالية لعنصر إنشائي بسبب تدفق

حركة المرور العادية؛ تحري حول الأرض؛ فقدان الطاقة الكامنة؛ احتمال الانهيار؛ استخدام موظفين للتحكم بحركة السير بدلاً من الإشارات الضوئية؛ إدارة المعدات والأشخاص؛ الخ.

- تقدير وتيرة وقوع هذه الأخطار.
- تقدير مستوى كل خطر، منخفض أو متوسط أو عالي.
- إيجاد طريقة لتحديد الحوادث ذات مستوى الخطر المتوسط والمرتفع، وتقدير الحوادث بمستوى منخفض من الخطر مع هدف إمكانية من هذه الحوادث.

يوجد إجراء تحليل الخطر الذي يسمح بحساب درجة احتمال وقوع الخطر (1–10) ودرجة النتائج (1–10) وتستبدل في المعادلة (*). فكلما زادت الدرجة زاد الخطر.

وبالتالي تكون قيمة الخطر الأدنى = 1.0 × 1.0 = 1.0.

والخطر الأعظمي = 10 × 10 = 100.

وضع احتمال لحالات الطوارئ مطلوب دائماً في حالة حصول حدث غير متوقع مثل تعطل الأجهزة؛ زيادة الوقت اللازم لإكمال الاختبار عما كان متوقعاً؛ أضرار جزئية مؤقتة تتطلب تدعيم مؤقت؛ أو إصابة الأفراد، الخ. هذا يعزز الحاجة إلى التخطيط السليم لما قبل الاختبار واختبار مسبق للمراحل لتطوير برنامج اختبار تفصيلي آمن.

الخاتمة

بعد الانتهاء من عملية المعاينة يتم تحديد المشاكل والعيوب الموجودة في المنشأ بما يساعد في الانتقال إلى المرحلة التالية وهي تقييم الوضع الراهن للجسر بناءً على المعلومات التي حصلنا عليها إضافةً إلى ملئ استمارة المعلومات الخاصة بالمنشأ وحفظها ضمن الأرشيف الخاص بها حتى نستفيد منها لاحقاً عند إجراء عمليات صيانة مستقبلية.

5-3-تقييم الحالة الراهنة [2]

وهي المرحلة اللاحقة لعملية المعاينة كما ذكرنا سابقاً. تبدأ عملية التقييم بعد القيام بالفحص الدقيق للجسر وتحليل الملاحظات التي تمت بالمعاينة البصرية والاستفادة من نتائج التجارب التي أُجريت على الجسر.

لا توجد طريقة عامة للتقييم يمكن تطبيقها على جميع الجسور ولا حتى على نمط محدد من الجسور وبالتالي ستختلف الطرائق المستخدمة في الترميم وإعادة التأهيل حسب طبيعة العيوب الموجودة.

5-3-1- طرائق التقييم (Evaluating Methods) (Ryall, Mike. 2001) [25]

يعود التطور التاريخي والعملي لنظريات التحليل الإنشائي للأقواس للعام 1936 عندما أجرى البروفيسور (Pippard) تحت رعاية مركز بحوث البناء (Building Research Station) دراسات تنطوي على تجارب مخبرية عن قصور العديد من الجسور الحجرية القوسية لاستنباط المبادئ النظرية والتجريبية لاستخدامها من قبل مهندسي الجسور. النظريات المتقدمة في ذلك الوقت كانت تهدف إلى معرفة قدرة تحمل جسم القوس الحجري والذي هو مفتاح تحميل العنصر في جسر قوسي حجري. هذه النظريات هي:

5-3-1-1-طريقة المرونة (The elastic method).

5-3-1-2- الطريقة الميكانيكية (The mechanism method).

5-3-1-3-طريقة التصدع-المرن (The cracking-elastic method).

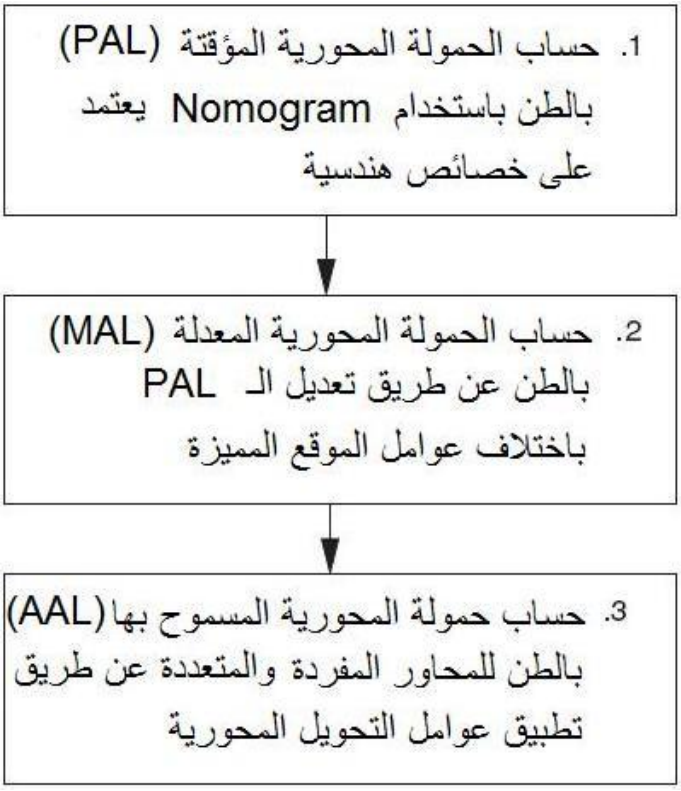
5-3-1-1- الطريقة المرنة (The Elastic Method)

تعتمد هذه الطريقة على واحدة قيمتها (1م) مع عرض يُفرض مكافئاً لعرض جسم القوس مع تدعميه ويكون معامل الفتحة/ارتفاع بقيمة (4). يرتكز التحميل الآمن بشكل أساسي على تحديد نسبة إجهادات الشد والضغط المسموح بها للحجر إلى عامل أمان يتراوح بين (3-4) من أجل الانهيار.

يبين الشكل (5-12) مخطط بسيط للمراحل الثلاثة لطريقة (MEXE) التي وضعتها مؤسسة الهندسة العسكرية التجريبية (Military Engineering Experimental Establishment).

في الخطوة الأولى نحسب الحمولة المحورية المؤقتة (PAL: Provisional Axle Load)، في الخطوة الثانية نحسب الحمولة المحورية المعدلة (MAL: Modified Axle Load) وذلك بتعديل قيمة الحمل وفقاً لمتغيرات معاملات الموقع.

الخطوة الأخيرة الحمولة المحورية المسموحة (AAL: Allowable Axle Load) هي التي يمكن أن تحكم ثبات القوس. أشار (Hughes and Blackler. 1997) [20] إلى أن هناك عدد من نقاط الضعف في هذا الأسلوب، أهمها عدم التأكد من التعديلات المختلفة للعوامل والافتراضات الواردة عند اشتقاق الحمولة المحورية المؤقتة. قام Woolfenden, (1993) [28] بتقديم تحليل شامل لجميع نقاط الضعف وتبين أن هذا الأسلوب يعطي نتائج موثوقة، وتُعتبر بريطانيا أول من استخدم طرائق تقييم قدرة قوس.

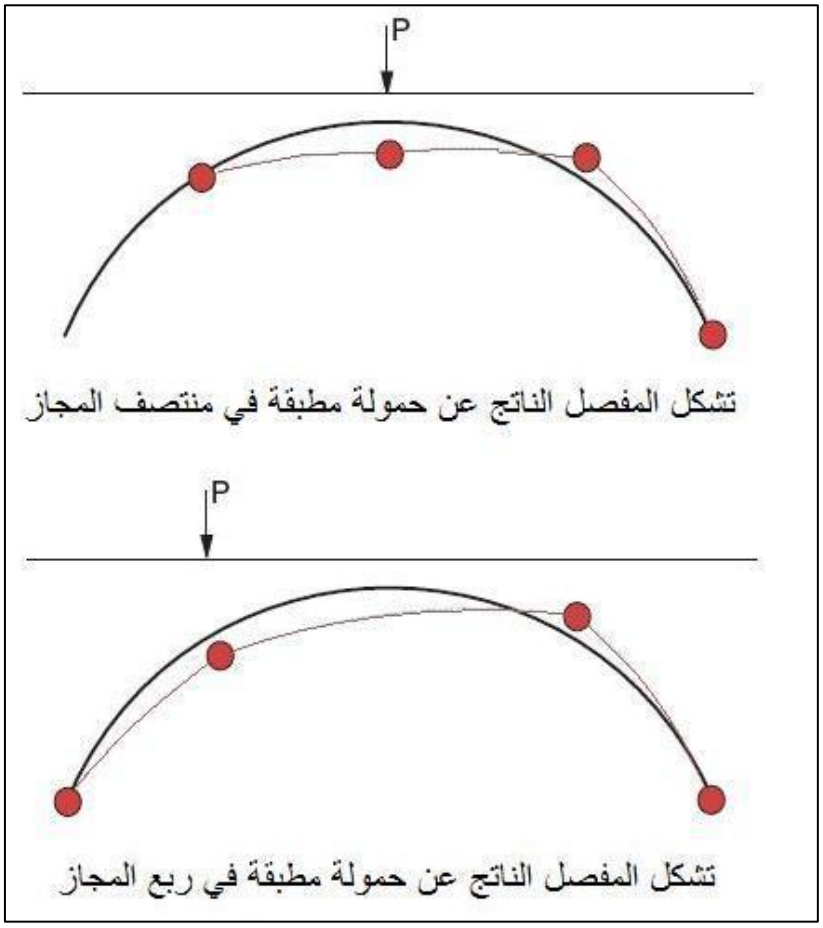


الشكل (5-10) الخطوات وفق طريقة (MEXE) (Ryall, Mike. 2001) [25]

5-3-1-2- الطريقة الميكانيكية (The mechanism method)

أظهرت التجارب المشار إليها سابقاً من قبل البروفيسور (Pippard) أن انهيار الأقواس يعود لتشكل المفاصل في جسم القوس (Das, 1993) [15]. وبهذا الخصوص قام

البروفيسور (Heyman) فيما سبق بإجراء الأبحاث وطور ما يعرف الآن باسم الطريقة الميكانيكية (الآلية) (Heyman, 1982) [18].

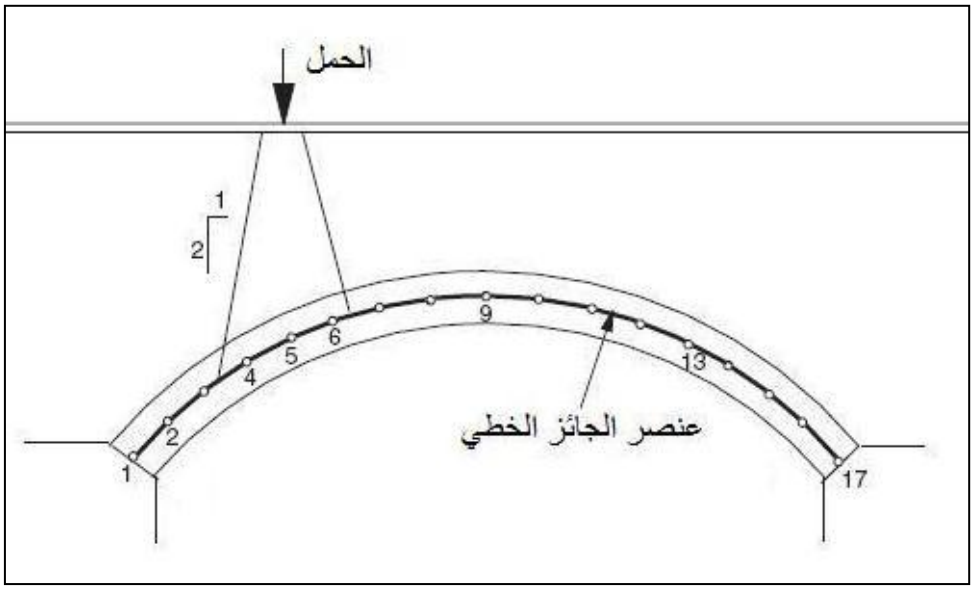


الشكل (5–11) آلية المفاصل الأربعة في الأقواس الحجرية

تنتقل الحمولة عبر القوس على خط انتشار معين، والمسار الطبيعي لهذا الخط هو أن تنتقل إلى الأساسات. يختلف مكان تطبيق محصلة إجهادات الضغط حسب مكان وجود الأحمال المطبقة. تتشكل المفاصل وتتحرك إلى وضعيات تتحدد حسب طريقة تطبيق الحمولة (على المحور). يبين الشكل (5–14) مثال نموذجي ثنائي البعد يُستخدم للتحليل. تستخدم البرامج منهج تقريبي برسم خط الانتشار بتأثير زيادة الحمولة حتى الوصول إلى آلية المفاصل الأربعة التي تتطور تدريجياً حتى تصل إلى مرحلة الانهيار.

وصف (Woolfenden 1993) [28] نماذج عن العناصر المحدودة ذات بعد واحد، بعدين وثلاثة أبعاد والتي يمكن أن تأخذ بعين الاعتبار إجهادات الضغط المحددة في

جسم القوس؛ العيوب مثل التشققات؛ فقدان المونة وحلقات القوس المنفصلة؛ وكذلك إمكانية الدوران أو انتقال المساند. إضافة لذلك يمكن للتحليل ثلاثي الأبعاد أن يبين الانحرافات (Choo et al.1995) [14]؛ تصلب مواد الربط، (Hodgson&Fashole-Luke, 1997) [19]؛ التشققات المائلة وتصلب الجدران أعلى القوس.



الشكل (5-12) التمثيل الخطي النموذجي للعنصر القوسي

5-3-1-3- طريقة التصدع-المرن (The cracking-elastic method)

تستخدم هذه الطريقة العناصر المحدودة أحادية وثنائية البعد لفحص الإجهاد والانحراف للنقاط على طول جسم القوس نتيجة الأحمال المطبقة ويتم نمذجت التربة كنوابض بسيطة. يتم تحديد مساحة الإجهادات الممكنة لخضوع الشد (وبالتالي التشقق) للحجر وتعديل خصائص المقطع من خلال تقليل سماكة جسم القوس، وبما أن عمق التشققات متغير نستطيع تقليل العناصر الخطية. وقد تسبب التشوهات تغيير الشكل الهندسي للقوس. ونستمر بهذه العملية حتى نصل إلى النقطة التي يحدث عندها الفشل.

إن هذا الأسلوب يمكن أن يعطي نتائج جيدة لكنه يتطلب برمجة متطورة جداً من أجل التحديث المستمر للنموذج والتي قد لا تتوافر بالسهولة الممكنة.

استنادا إلى الخصائص الهندسية لمواد جسر خاص، درس (Hughes&Balckler 1997) [20] الأداء العام لأربعة أساليب/طرق تقييم بالاعتماد على معايير مُفترضة خاصة.

ساعدت هذه الدراسة في استنتاج دليل جيد يساعد لاختيار وسيلة مناسبة للتقييم وهي كما بالجدول (5–1).

الجدول (5–1) التقييم العام لطرائق الأداء وفق (Hughes and Balckler 1997) [20]

No.	المعيار	Cracking-Elastic	Mechanism	Pinned Elastic	MEXE
1	التوقع الصحيح لقدرة تحمل الأحمال	A	A	A	A
2	إمكانية إجراء التقييم بكلفة معقولة	P	A	A	G
3	تحديد النموذج الصحيح لحالات الانهيار	G	A	P	P
4	أخذ المعايير الدقيقة المتعلقة بقدرة التحمل	G	A	P	P
5	تقليل استخدام عوامل إضافية	G	G	A	P
6	تقديم تقديرات إضافية للسلوك	G	A	P	P
7	السماح تدريجياً بأبحاث أكثر تفصيلية عن الجسور	G	A	P	P
8	نموذج أعمال التأهيل والترميم	G	G	A	P
9	السماح باستخدام البرمجة لأحمال الخدمة	G	P	A	P
10	أن تكون قابلة للتحسين باستخدام معلومات إضافية	G	A	P	P

ملاحظة: P ضعيف، A وسط، G جيد.

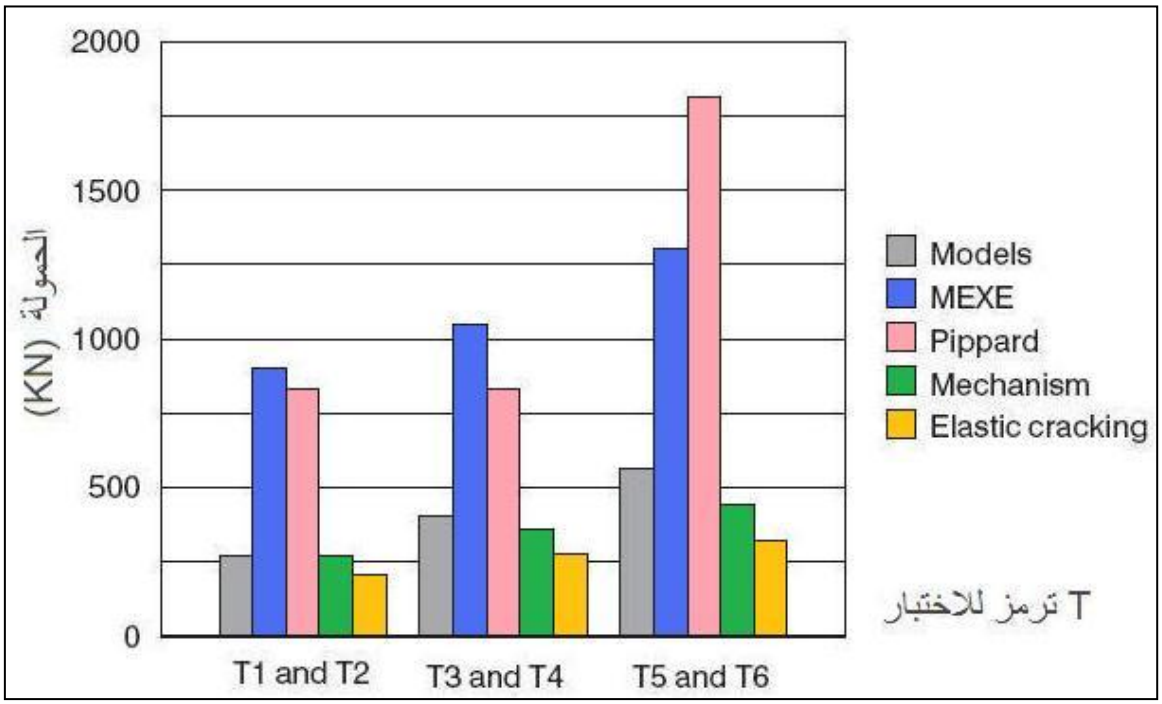
بهذا التقدير يبدو بوضوح أن طريقة التصدع–المرن هي أكثر فائدة، ولكنها قد تكون مكلفة وليست أكثر 'دقة' في تقييم قدرة تحمل الأحمال من الطرق الأخرى.

5–3–1–4– نمذجة طريقة الطرد المركزي (Centrifuge modelling)

تم إجراء سلسلة مثيرة جداً للاهتمام من التجارب على نماذج من أقواس قرميدية في أجهزة الطرد المركزي كما ذكر (Hughes et al. 1998) [21] ويعود سبب القيام بهذه الاختبارات إلى أن الجاذبية مسيطرة على السلوك الإنشائي للأقواس، كما أن النماذج

التقليدية للأقواس لا تعطي المقياس الحقيقي للإجهادات في مواد الردم وجسم القوس. إن استخدام أجهزة الطرد المركزي يزيد من الكثافة الواضحة للمواد الانشائية. استخدم (Hughes et al. 1998) [21] نماذج بمقياس (1/6)، وبالتالي يجب أن توفر أجهزة الطرد المركزي قوة تعادل (6g)، مما يجعل المواد تبدو أثقل ست مرات. بمقارنة النموذج الممثل للقصور مع تلك المحسوبة من الطرق الأربعة للتقييم الموجودة في الجدول (5–2) النتائج موضحة في الشكل (5–15).

من الشكل (5–15) يتضح أن آلية وطريقة التصدع المرن تقدم تقييمات أكثر دقة للقوة، في حين أن (MEXE) و(Pippard) تعطي قيماً مبالغ فيها بمقدار 2–3 مرات. لذلك يمكننا استبعاد الطريقتين الأخيرتين واستخدام الطريقة الآلية بشكل عام، وأكثر الطرق تطور طريقة التصدع المرن إذا سمح الوقت والكلفة.



الشكل (5–13) النموذج الممثل للفشل ونماذج الطرق الأربعة الأخرى وفق (Hughes et al. 1998)

5-3-2- تصنيف حالة الجسر بعد معاينته وتقييم وضعه: (Bouhaloufa, Ahmad. Et al. 2010) [10]

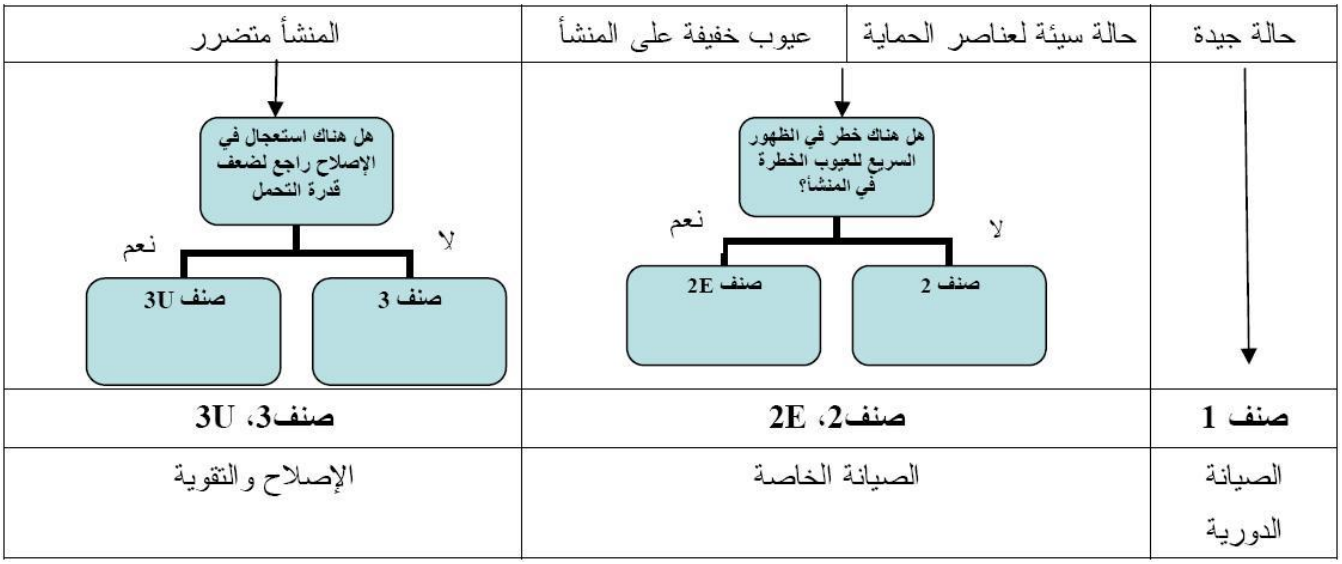
إن الهدف من عملية التقييم هو التوصل إلى معرفة وضع الجسر وحالته الراهنة. ويتضح مما سبق أن عملية التقييم معقدة لأنها تعتمد على الكثير من المتغيرات وتحتاج إلى اتخاذ العديد من القرارات.

يمكننا تحديد الحالة الراهنة لجسر ما من الجدول (5-2) وفق النورم الفرنسي الذي يعطي حالة الجسر حسب العيوب الموجودة فيه وذلك من باختيار صنف من بين خمسة أصناف لدرجة التضرر. قد تكون الدرجة متممة بالعلامة (S:Safe) كدليل على أمان مستعملي الجسر. ويجدر الذكر أن عيوب الجملة الإنشائية فقط تصنف في الصنف 3.

الجدول (5-2) درجات العيوب في الجسور الحجرية وفق النورم الفرنسي [10]

حالة الجسر	درجة التصنيف
جسر في حالة جيدة ظاهريا، بعد الصيانة الدورية العادية.	1
الجملة الإنشائية في حالة جيدة ظاهرياً لكن عناصر الحماية تبدي عيوباً. الجملة الإنشائية تبدي أضرارا خفيفة. تتطلب صيانة خاصة دون الحاجة للسرعة.	2
لجملة الإنشائية في حالة جيدة ظاهريا لكن التجهيزات أو عناصر الحماية تبدي عيوباً. الجملة الإنشائية تبدي أضرارا خفيفة. تتطلب صيانة خاصة مستعجلة، من أجل حماية التطور السريع للعيوب في المنشأ وعدم وصوله إلى الصنف /3/.	2E
الجملة الإنشائية للجسر متضررة تتطلب بعض الإصلاحات لكن دون السرعة بالتدخل.	3
الجملة الإنشائية للجسر متضررة جداً، وتستوجب سرعة التدخل بالإصلاح أو التقوية، وتتعلق بضعف قدرة تحمل الجسر، أو بالتطور السريع للعيوب الظاهرة التي يمكن أن تؤدي إلى الحالة الحرجة.	3U

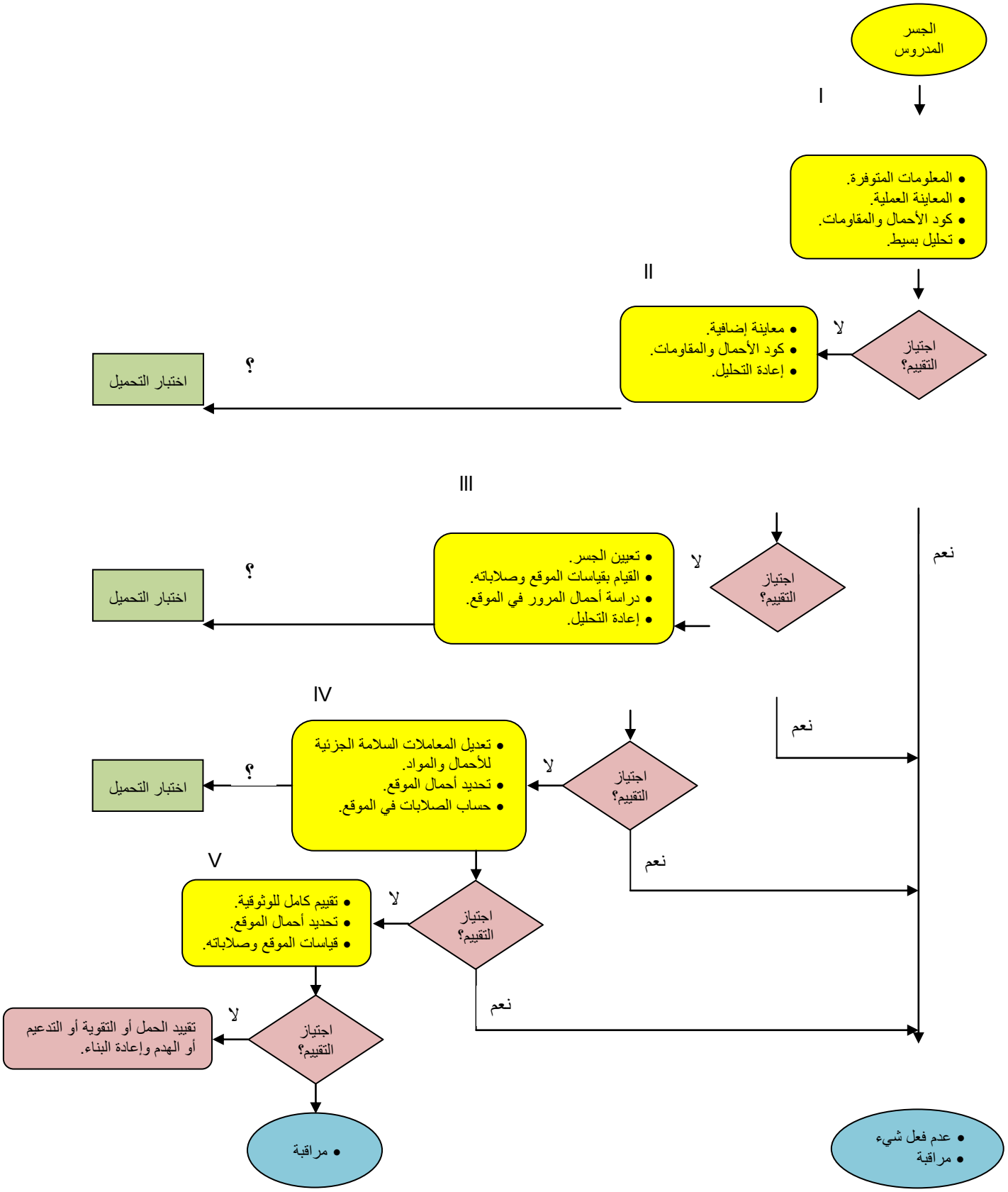
ملاحظة: *يوجد العديد من الكودات التي تعطي درجات الحالة الراهنة، منها الكود الأمريكي (الآشـــتو)، والكود السويدي وجميعها تعتمد على نفس الطريقة لكن الاختلاف يكون بعدد الدرجات. وفيما يلي مخطط عام للتصنيف حسب* ***(SETRA, 1996) [26].***



الشكل (5-14) مخطط تصنيف الحالة الراهنة للجسور القائمة

-يبين المخطط التالي سلسلة من الخطوات تسمح لنا بالتحقق من حالة الجســـر الخاضـــع للدراسة بحيث تساعدنا على معرفة إمكانية تطبيق اختبار الحمل (كمل ورد شرحه ســـابقاً ضمن الفقرة 5 2-3-1 من هذا الفصل).

حيث أننا في البداية نقوم باستخدام المعلومات المتوفرة عن الجسر والنتائج الأوليـــة للمعاينة البصرية ونقوم بتحليله، فإن لم يجتز التقييم يتم إجراء معاينات إضافية وإعـــادة تحليله، وهكذا بالتدريج يتم الانتقال خطوة تلو الأخرى كمحاولة للاستفادة من أكبر قـــدر ممكن من المعلومات النظرية والاختبارات العملية المتعلقة بهذا الجسر بما يمكننـــا مـــن الحصول على نتيجة إيجابية لتقييم أدائه، لأنه في حالة فشل التقييم فـــإن هـــذا الجســـر سيكون بحاجة لعمليات تدعيم ليعود قادراً على الخدمة.



الشكل (5-15) مخطط استخدام مستويات التقييم (Ryall, Mike. 2001) [25]

5-4-قابلية تدهور الجسور الحجرية عند تعرضها للزلازل

تم تصميم الجسور القديمة من أجل تعرضها للأحمال الدائمة (الستاتيكية) دون أخذ تأثير الزلازل بعين الاعتبار، لكنها في الواقع قد تتعرض لأحمال ديناميكية، إذ تقع سوريا في منطقة معرضة للزلازل لذلك سنحاول التوصل لإجراء تقييم زلزالي لمنشآت الجسور التاريخية.

5-4-1 الضرر الزلزالي على الجسور الحجرية (Bhatti, Abdul Qadir. 2009) [9]

لا تتوفر معلومات كثيرة عن الأضرار الزلزالية للجسور الحجرية، لأنها محدودة وبسبب صعوبة الحصول على معلومات عنها. كذلك، لا يرتبط الخطر الزلزالي لهذا النوع من المنشآت بتعطل وظيفة بعض أجزاء نظام البنية التحتية فقط بل بخسارة الأرواح البشرية وهذا سبب آخر لمحاولة معرفة أكبر قدر من المعلومات عن هذه الجسور والتأكد من المعلومات المتوفرة عنها، خاصة لتلك المناطق التي تسبب فيها الزلازل إلى وقوع العديد من الضحايا. لذلك، تبدو قابلية إصابة الجسور الحجرية مسألة مثيرة للاهتمام خاصة في أوروبا.

وعلى الرغم من اختلاف تقنيات البناء من منطقة إلى أخرى بسبب اختلاف المواد المتوفرة في الموقع واختلاف طرائق الدراسة و التنفيذ، فإن دراسة أدلة الضرر الزلزالي على الجسور الحجرية في أية دولة تساعد في معرفة آليات هذه المنشآت في دول أخرى.

يظهر في الشكل (5-16) مثال أخر عن جسر حجري عمره (88) سنة، والذي تضرر بسبب زلزال (Bhuj) في الهند عام /2001/. يمكن الملاحظة أن الزلزال سبب انقلاب الجدران فوق الأقواس وتداعي مواد الربط وتكشف سكة القطار.

ويظهر في الشكل (5-17) ضرر الأجزاء أعلى القوس الحجري نتيجة الزلزال الذي حدث في المناطق الإيطالية (Umbria Marché) عام /1997/. نلاحظ أن أكثر الأضرار الموضعية الحاصلة والمتمثلة بتضرر ركائز الجسور وانقلاب الدرابزين والجدران فوق القوس يعود إلى مشاكل في تماسك القطع الحجرية مع المواد الرابطة.

الشكل (5-16) جسر حجري متضرر بعد زلزال (Bhuj)، 2001، الهند Bhatti, **[9]** (Abdul Qadir. 2009)

الشكل (5-17) تضرر جسر حجري بعد زلزال (Umbria&Marche) عام1997 **[9]** (Bhatti, Abdul Qadir. 2009)

5-5- خاتمة

مما سبق نلاحظ أننا نستطيع تقييم الحالة الراهنة للجسر المدروس من عدة نـــواحٍ، من الناحية النظرية باستخدام ما يتوفر عنه من معلومات تم جمعها ســـابقاً ومـــا اســـتطعنا جمعه باستكمال البيانات الناقصة (من أبعاد وصور وأعمال صيانة وأية معلومـــات غيـــر مذكوره عنه لاستكمال استمارة المعلومات الخاصة به)، ومن الناحية العملية عـــن طريـــق معاينته وإجراء اختبارات للمواد ثم استخدام النتائج وفي النهاية التوصل للتوصيف الكامـــل لحالته الراهنة.

وباعتبار أن الجسور الحجرية القديمة عند تصميمها لم يؤخذ بعين الاعتبار دراســـة مقاومتها للأحمال الزلزالية كما استعرضنا ضمن الفقرة الأخيرة مثالاً لجســـرين تعرضـــا لحركات أرضية وتضررا لكنهما لم ينهارا.

في الفصل القادم سوف نستعرض عدداً من الطرائق المستخدمة للتـــرميم وإعـــادة تأهيل الجسور الحجرية المتضررة وميزات كل منها. وذلك كله بهدف الحفاظ علـــى هـــذه الجسور وزيادة عمرها التصميمي.

الفصل السادس: الترميم وإعادة التأهيل

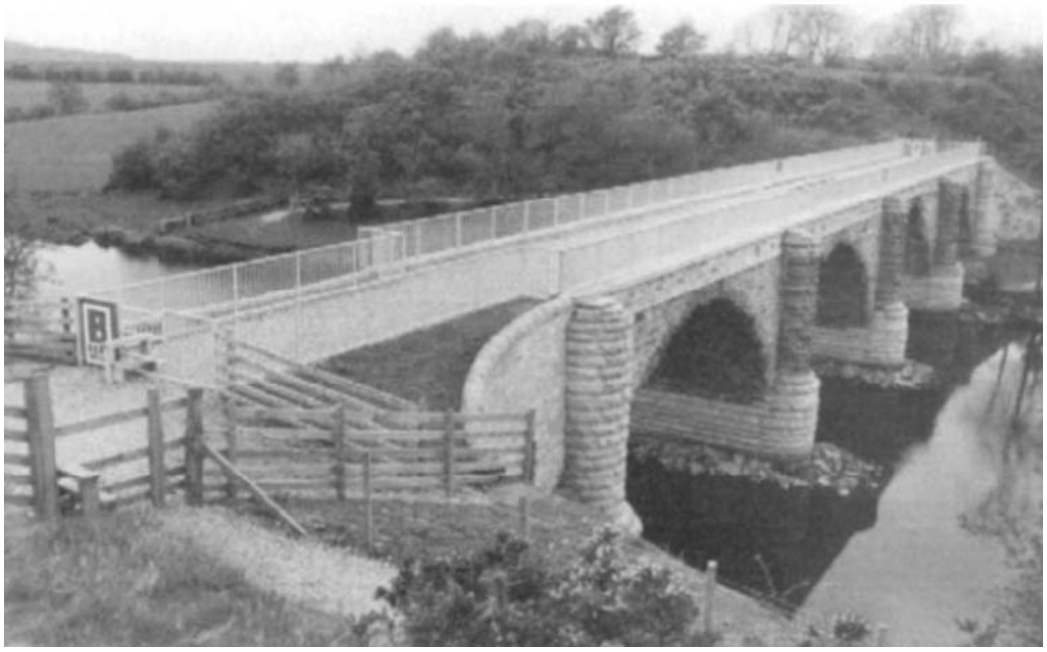
6-1- مقدمة [5] [25]

منذ زمن طويل تم استخدام الأحجار لإنشاء المباني، وبالرغم من الانتشار الواسع لاستخدام المواد الحديثة مثل البيتون المسلح والفولاذ إلا أن الأبنية الحجرية بقيت مستخدمة بشكل واسع في العديد من دول العالم.

لذلك تم اللجوء لدراسة تقوية وإعادة تأهيل المباني والجسور الحجرية سواءً السليمة منها أو المتضررة أو الآيلة إلى السقوط حيث تتضمن اقتراحات التدعيم. كذلك من الممكن استبدال الجدران المتضررة كلياً وإصلاح وتقوية الجدران الحجرية الأثرية المتضررة جزئياً وفق طرائق قابلة للتطبيق على أرض الواقع كما سيرد لاحقاً.

نذكر مثالاً جسر (Laigh Milton Viaduc) فوق نهر (Irvine) الموجود في اسكتلندا (Meagher 1997)؛ يبين الشكل (6-1) الجسر قبل وبعد إعادة تأهيله.

الشكل (6-1-a) جسر (Laigh Milton Viaduc) قبل إعادة تأهيله [5]



الشكل (6–1–b) جسر (Laigh Milton Viaduc) بعد إعادة تأهيله [5]

6–2– طرائق الترميم (شديد، ادوار.) [5] (Ryall, Mike. 2001) [25]

للتمكن من معرفة الخيار المناسب لتحديد طريقة إعادة تأهيل أي منشأ لابد من معرفة المشكلة أي الضرر الحاصل أو التشوه المراد إصلاحه.

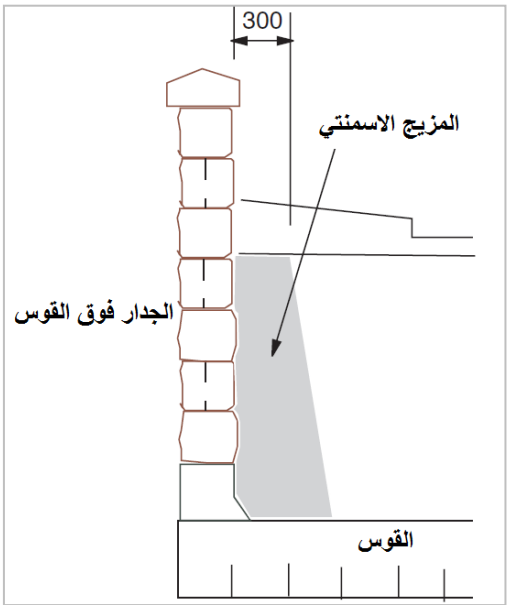
قد تكون المشكلة بسبب:

- انفصال الجدران فوق القوس بسبب الدفع الجانبي للتربة.
- تفكك حجر البناء بسبب الظروف المناخية مثل الامطار الغزيرة والرياح؛ تناوب عمليتي التجمد والذوبان ونمو النباتات.
- فقدان في المواد الرابطة وتشكل الفراغات.
- انفصال حلقات القوس.
- تشقق جسم القوس.
- تضرر الركائز.
- استخدام الأحجار غير منتظمة الحجم.
- عمق التأسيس ونوعية التربة: يجب منذ اختيار موقع البناء التأكد من قدرة تحمل التربة لتجنب ظاهرتي انزلاق وتميع التربة (Soil Liquefaction) وأن يكون عمق التأسيس كافٍ.

نستعرض فيما يلي عدداً من الطرائق المستخدمة في عمليات إعادة تأهيل العناصر المكونة للجسر الحجري القوسي:

6-2-1- تدعيم الجدران فوق القوس (Ryall, Mike. 2001) [25]

تميل الجدران أعلى القوس إلى التشوه مع الوقت إذا كان الجسر مصمم لمرور العربات الثقيلة. يعتبر إعادة بناء الجدران المنتفخة أفضل وذلك من خلال الحفر خلفها وإعادة بنائها بشكل تقليدي. هذا الشرط قد يتطلب هدم جزئي وإعادة تجميع، أو إزالة كاملة وإعادة بناء. يمكن دعم الجدار باستخدام مزيج اسمنتي بسماكة (300 – 450 مم) لتأمين سماكة إضافية للأطراف. ومن الممكن استخدام خرسانة خفيفة الوزن كما في الشكل (6-2).



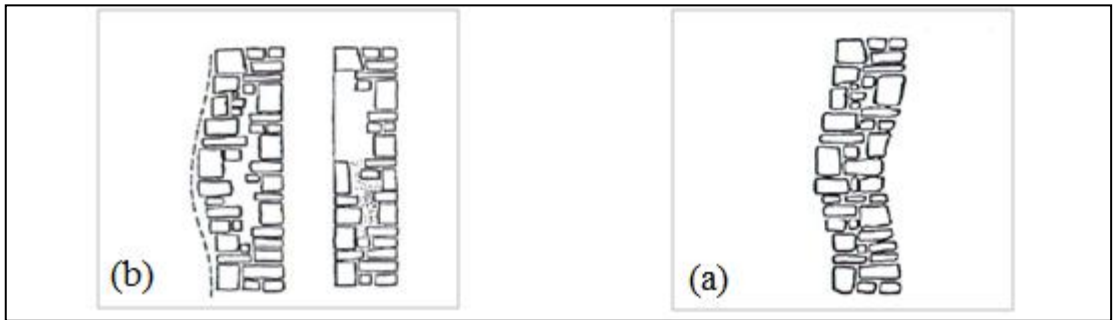
الشكل (6-2) تدعيم الجدار فوق القوس. (Ryall, Mike. 2001) [25]

6-2-2- صيانة وتدعيم الركائز والدعامات (شديد، ادوار.) [5]

يتم تدعيم الركيزة/الدعامة بخليط من الحجر (من نفس نوع الحجر المستخدم) مع الإبيوكسي، وضع قضبان من الرصاص ضمن الركيزة/الدعامة لإبقائها متماسكة.

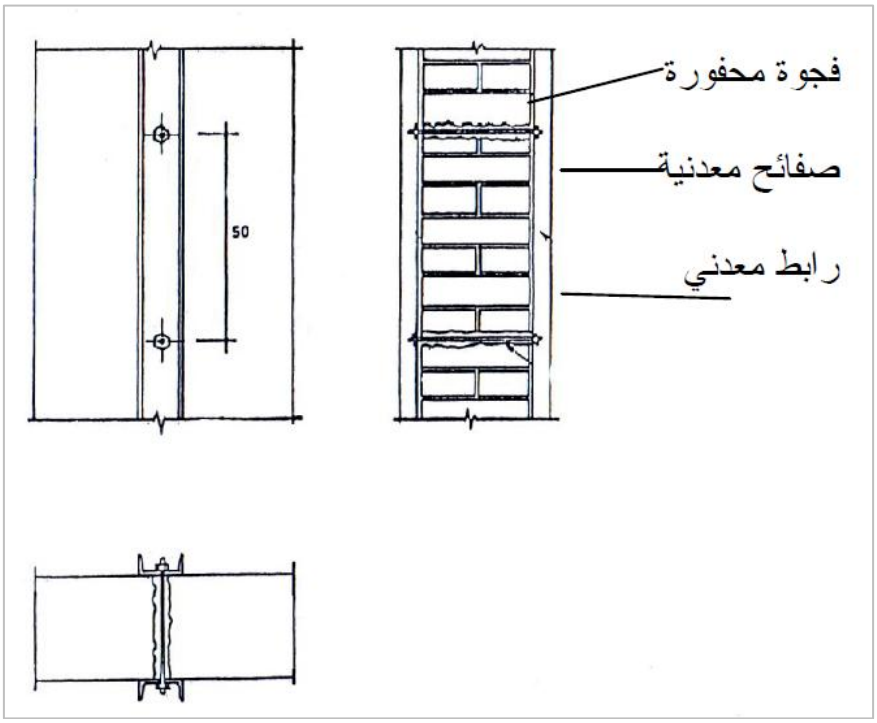
قد تتطلب بعض الحالات إزالة الجزء المشوه من الركيزة/الدعامة وإعادة بنائها من جديد وهنا يجب الانتباه أن يتم تركيب دعامات مؤقتة لتدعيم الأجزاء من المنشأ التي تستند على الجزء المتضرر المراد تدعيمه. قد يظهر تضرر الركيزة/الدعامة بشكل تحدب أحد الوجهين أو وجه واحد، فإذا كان التحدب على كلى الوجهين يجب إزالة الجدار وإعادة

بنائه، أما إذا كان التحدب على وجه واحد يمكننا أن نرممه بوضع الأحجار أو ملئ الفراغات بالبيتون أو المونة الإسمنتية بما يناسب الحالة. الشكل (6-3-a)، (6-3-b).



الشكل (6-3) جدار محدب من وجه واحد ووجهين. (شديد، ادوار.) [5]

ومن إحدى طرائق تدعيم الركيزة/الدعامة هي التخريم بواسطة المقاطع المعدنية إذ نستخدم المقاطع الفولاذية الإنشائية بتباعدات متساوية (50 سم) ويتم حفر فجوات ضمن الكتل الحجرية كما بالشكل (6-4).

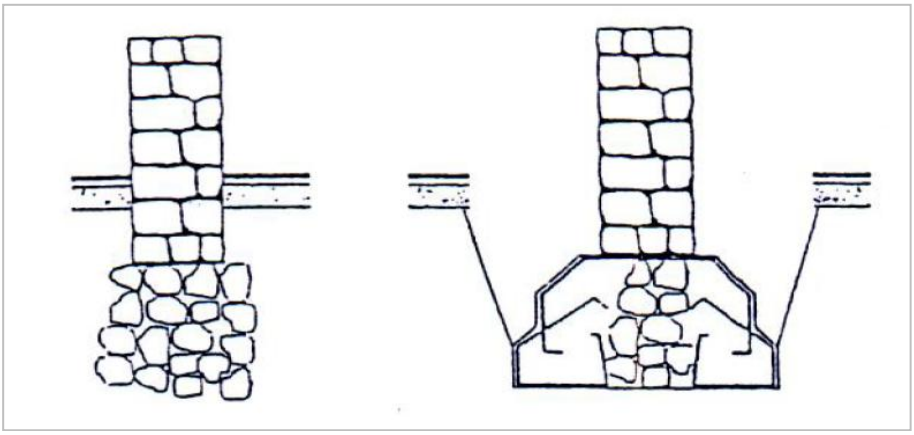


الشكل (6-4) التدعيم بطريقة التخريم. (شديد، ادوار.) [5]

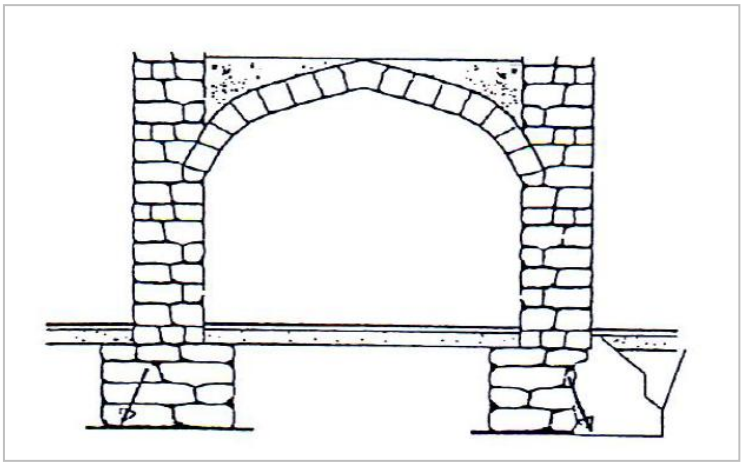
6-2-3-تقوية الأساس (شديد، ادوار.) [5] (Carneiro Alves, Ana Sofia. 2009) [13]

وذلك بزيادة عرضه من خلال تغليفه بالكامل بالبيتون المسلح أو استخدام البيتون من جهة واحدة في حال تعرضه لحمولات لا مركزية. يتم تدعيم الأساسات على مراحل إذ لا يمسح بالحفر بجوار الأساس لمسافات كبيرة للحفاظ على سلامة المنشأ.

حقن الأساس بمحلول إسمنتي: وذلك إذا كانت الأساسات الحجرية ذات عمق تأسيس قليل ومنفذة على تربة متوسطة-جيدة التحمل و/أو إذا كانت أحجار الأساس خالية من المواد الرابطة أو تكون المادة الرابطة قد تآكلت بفعل العوامل الخارجية، أو عند انخفاض قدرة تحمل التربة بسبب تغير منسوب المياه الجوفية بما يحقق رفع قدرة تحملها.



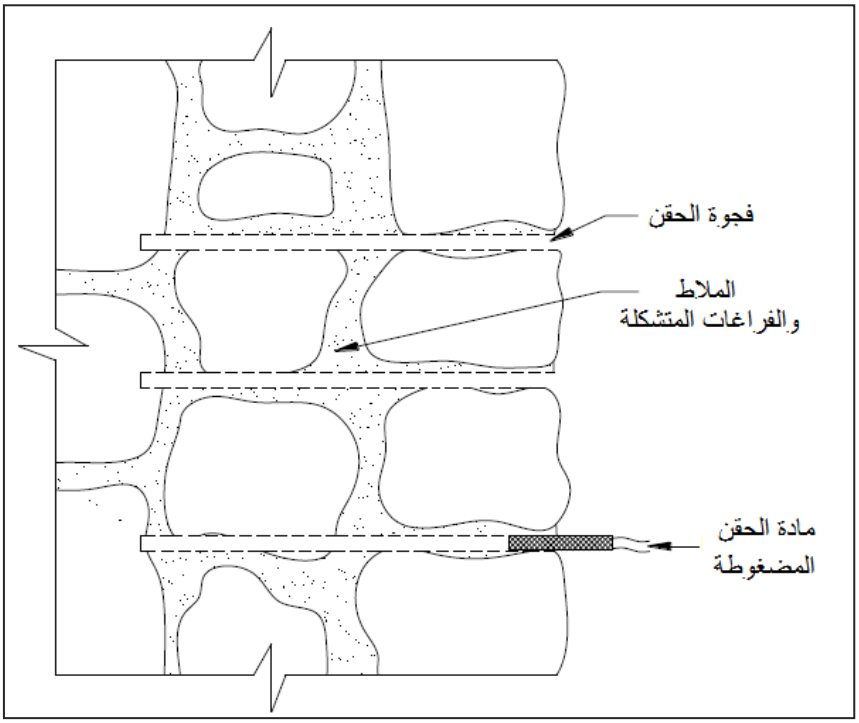
الشكل (6-5) تدعيم الأساسات الحجرية بغلاف البيتون. (شديد، ادوار.) [5]



الشكل (6-6) تدعيم الأساسات الحجرية من جهة واحدة. (شديد، ادوار.) [5]

6-2-4-التدعيم بالحقن (Injections) (Beuerman, Thomas E. 2009) [8]

تستخدم هذه التقنية لملئ الفراغات المتشكلة بين القطع الحجرية في القوس أو الركائز. التدعيم بالحقن يمكن أن يرفع من قدرة التحملمن خلال تحسين طريقة انتشار الأحمال على القوس أو الركائز، ومن خلال زيادة وزن الركائز لتساهم في مقاومة قوى الدفع الأفقية. كما أن هذه الطريقة قد تستخدم كإجراء وقائي لتأخير انهيار المنشأ. يساعد الحقن في تخفيض كمية المياه الراشحة بين القطع الحجرية. يظهر في الشكل (6-7) تقنية التنفيذ، نقوم بصنع فجوات داخل المنشأ، تملأ بالماء لتنظيفها من المواد ثم يعاد ملؤها بالمادة المناسبة من الأسفل نحو الأعلى. تحقن المادة باستخدام آلة تعمل بالضغط ويجب الانتباه ألا تسبب قوة الضغط ضرراً للجسر. بعد الانتهاء من حقن الفجوات تغلق باستخدام جزء من الحجر أو الآجر أو أية مادة تعطي شكلاً مشابهاً للمادة الأصلية.

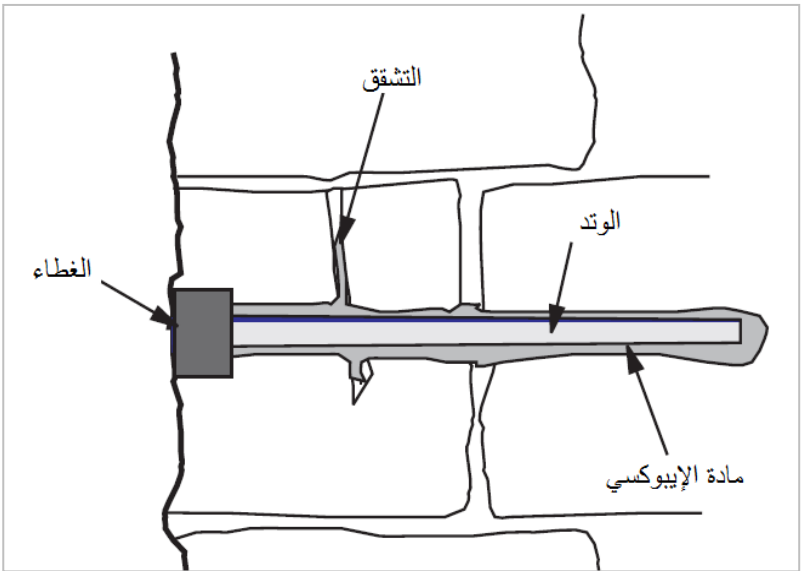


الشكل (6-7) التدعيم باستخدام الحقن. (Beuerman, Thomas E. 2009) [8]

6-2-5-الحقــن بالتوتيــد (Pinning technique) [25] (Ryall, Mike. 2001) ([13] (Carneiro Alves, Ana Sofia. 2009

للمحافظة على مواد الجسر من الممكن ملء الفراغات لإعادة ربط الأحجار معاً كما يوضح الشكل (6-8)، وذلك باستخدام أداة معدنية مخروطية الشكل تــدخل بــين الحجــر بحفرة قطرها حوالي (50 مم) وعمقها (50 مم) ثم تدخل هذه الأداة وتُحقَن الفراغات بمادة الإيبوكسي منخفضة اللزوجة.

تفيد هذه الطريقة في ترميم التشققات الطويلة إذ قد تصل إلى عمق (50 سم) أو أكثر.



الشكل (6-8) تقنية الحقن بالتوتيد. [25] (Ryall, Mike. 2001)

6-2-6-تقنية إعادة الملئ (Repointing) [8] (Beuerman, Thomas E. 2009)

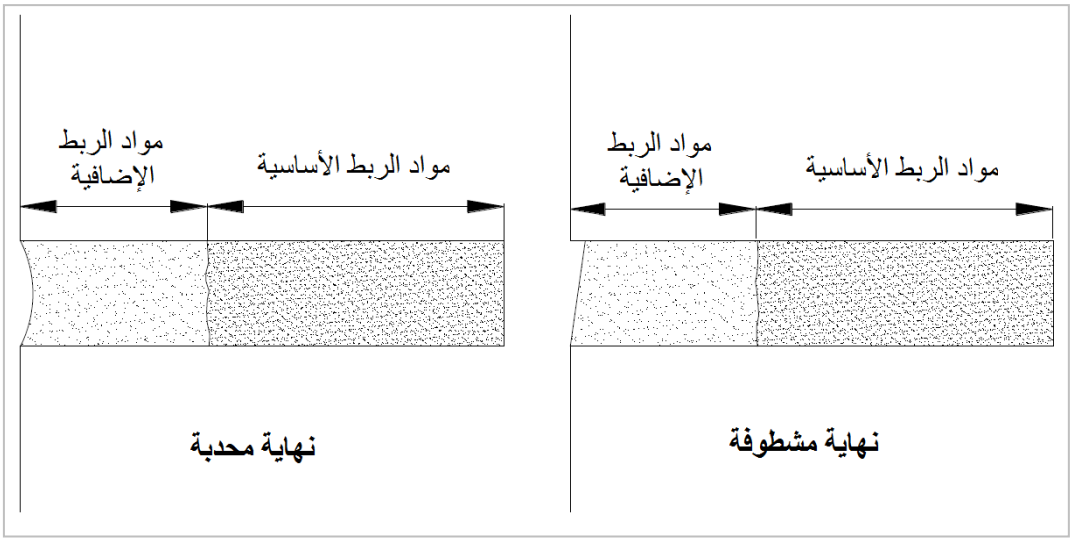
تصنف كعملية صيانة روتينية للترميم أكثر من كونها عملية تقوية. وهي عبارة عن إعادة تعبئة المفاصل المتضررة بين وحدات الحجر. من الممكن أن يستعيد القــوس قــدرة تحمله عن طريق إعادة تعبئة الفراغ ليماثل السماكة والعمق الأصلي، لكنها لا تزيــد مــن قدرته على تحمل الأحمال. كما قد تمنع هذه الطريقة من حدوث تدهور إضــافي للمنطقــة المرممة دون أن تحتاج إلى أعمال ترميم أخرى أكثر تكلفة.

إن تنفيذ هذه التقنية بشكل خاطئ قد يسارع من تدهور المنشا؛ إذ يجب أن لا تكون مــواد الربط لأن القوس سيستمر بالسلوك وكأن سماكته قليلة؛ وكذلك لا يجــب أن تكــون مــواد

الربط أكثر قساوة من المواد الحجرية لأن ذلك قد يؤدي إلى تكسير في وحـــدات الحجـــر. ومن الضروري اختيار مواد ربط بمواصفات مطابقة للمواد الأصلية في الجسر.

من أجل تنفيذ هذه التقنية بشكل صحيح يجب أن يتم كشط وتنظيف الســـطح العلـــوي مـــن المنطقة المرممة بمقدار أدنى (15 مم) ومن الأنسب أن يكون (25 مم). يجب أن يكون هذا المقدار موحد وبشكل مربع ويفضل تجنب الأدوات الكهربائية إذا كان من الممكن أن تسبب ضرراً في الحجر.

يبين الشكل (6–9) تقنية إعادة الملئ ومن الممكن أن يُشكل السطح الخارجي بشكل مقعـــر أو مشطوف وفقاً للشكل الأصلي له.



الشكل (6–9) تقنية إعادة الملء. (Beuerman, Thomas E. 2009) [8]

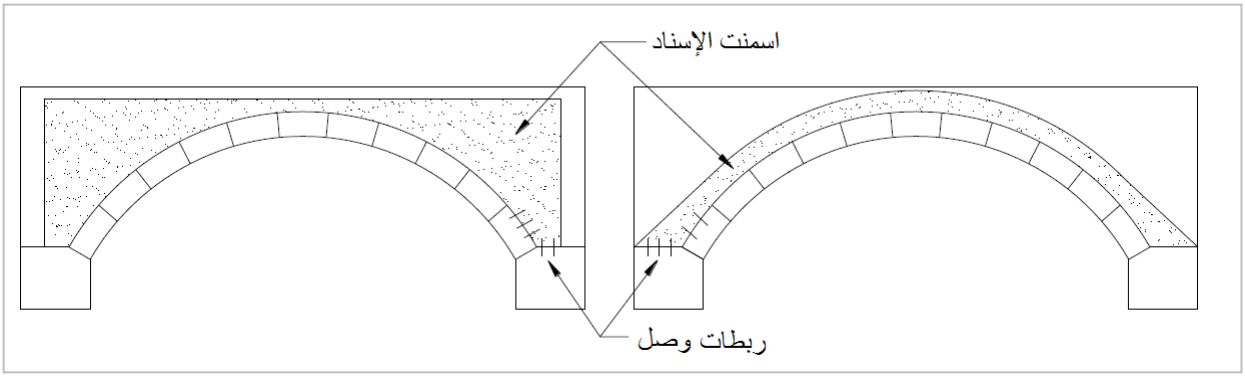
6–2–7–تقنية اســـتبدال الوحـــدات الحجريـــة (Replacing Units) (Beuerman, Thomas E. 2009) [8]

في كثير من الأحيان قد تتدهور قطع الحجر بشكل كبير خاصـــة الموجـــودة علـــى الأطراف لأنها مستهلكة. ومن الممكن أيضاً أن تتسبب الإجهادات بانفصال وبروز الحجـــر عن مكانها الأساسي. وفي كلتا الحالتين يقل المقطع الفعال في حلقة القوس ويسبب إجهادات إضافية في هذه المناطق. للحفاظ على المقطع الفعال في حلقة القوس والمساعدة في منـــع حدوث المزيد من التدهور يجب استبدال هذه الوحدات الحجرية. إذا كانت هذه الوحدات في

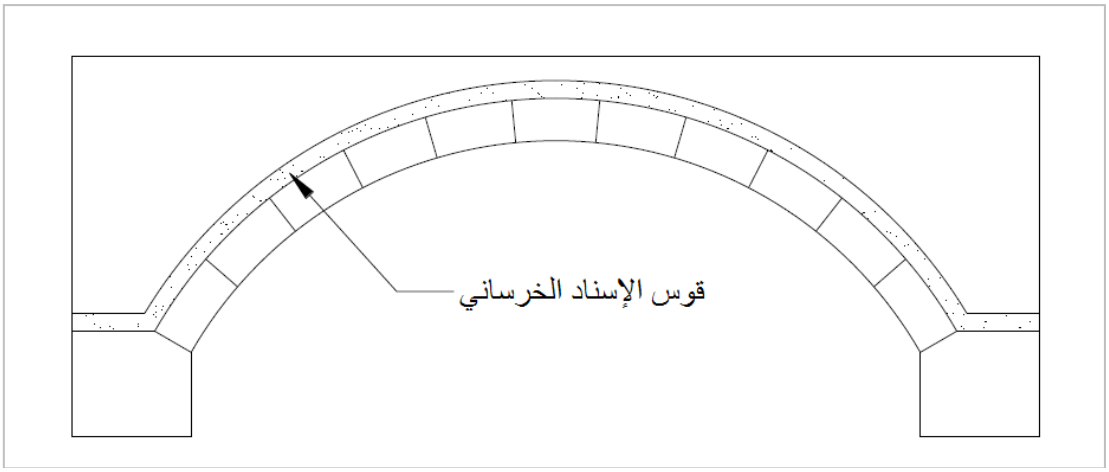
الجدران الخارجية أو رقيقة أو كان المقطع الضعيف فمن الممكن أن تتشكل قوى جانبية تدفع الجدار نحو الخارج، وتسبب حدوث انتفاخ ومن الممكن أن تقود لحدوث أضرار أكثر. يجب أن تُنفذ عملية الاستبدال باستخدام وحدات حجرية متناسقة من حيث المواد والخصائص واللون والحجم والمظهر. ومن الممكن استبدال حلقة القوس بشكل كامل عند الضرورة. في هذه الحالة قد يُفضَّل ربط الحلقة الجديدة مع المنشأ الأصلي بشكل جيد لضمان نقل سليم للأحمال. وكذلك عند التنفيذ يجب تأمين قوالب مؤقتة لتمنع حدوث تحركات أو انهيارات. تُعتبر هذه التقنية بسيطة ومنخفضة التكلفة وتمنع تطور المشكلة الموجودة إلى أضرار أكبر.

6-2-8- تقنية الإسناد (Saddling) [8] (Beuerman, Thomas E. 2009)

وهي تقنية ترميم معروفة تستخدم في العديد من الجسور القوسية التي تبدي علامات الضرر. تقوم على تفريغ المواد المالئة فوق القوس وصب مواد خرسانية جديدة بدلاً منها، والتي قد تكون خرسانة مسلحة. تكون الخرسانة عادة ذات متانة أقل لتؤمن التوفق مع الحجر. تستخدم هذه التقنية غالباً لترميم الجدار فوق القوس ولمنع تسرب المياه إلى المنشأ. خلال تنفيذ هذه التنقنية يتم الحفر حتى الوصول إلى جسم القوس. ويجب أن تكون عملية بشكل متناظر حول القوس لتقليل خطر حدوث انهيار أو حركة في جدران القوس. ويجب الانتباه إلى تثبيت أقنية التصريف قبل صب الخرسانة. كما يجب أن تصب الخرسانة بشكل متناظر حول منتصف القوس، وقد تكون بسماكات مختلفة أو سماكة واحدة كما بالشكل (6-10) والشكل (6-11).



الشكل (6-10) تقنية الإسناد بتنفيذ سماكات مختلفة. [8] (Beuerman, Thomas E. 2009)



الشكل (6–11) تقنية الإسناد بتنفيذ سماكة موحدة. (Beuerman, Thomas E. 2009) [8]

إن القوس الجديد المشكل من الخرسانة يصمم ليسلك سلوك القوس الحجري الأصلي وهذا ما يزيد من السماكة الفعالة للقوس. ويجب أن يتم ربط قوس التدعيم الجديد مع الركائز باستخدام ربطات وصل ليسمح بنقل جيد للحمولة.

إذا كان الضرر الحاصل في الجسر هو وجود تشققات في جسم القوس، فإن إضافة قوس التدعيم الخرساني سوف يسبب زيادة التشققات وبالتالي زيادة حركة الدعامة وتفاقم المشكلة. لذلك ليس من المستحسن استخدام هذه التقنية في هذه الحالة ويجب تجنبها.

كذلك في بعض الأحيان لا تكون للركائز القدرة الكافية لتحمل وجود قوس إضافي لذلك من الضروري تدعيم الركائز أيضاً أو استخدام تقنية ترميم أخرى للجسر.

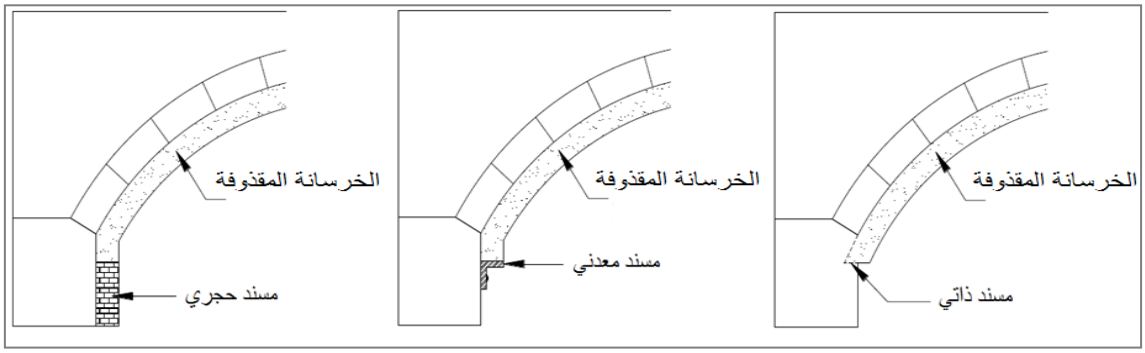
وحتى يكون التدعيم مفيد يجب أن تتحقق سماكة دنيا لقوس التدعيم بمقدار (150 مم).

6-2-9- الخرسانة المقذوفة (Sprayed Concrete) [8]

تستخدم الخرسانة المقذوفة بشكل تقليدي لزيادة سماكة حلقة القوس في محاولة لزيادة قدرة التحمل والاستقرار. تطبق على السطح الخارجي لحلقة القوس. في بعض الحالات النادرة يتم إزالة طبقة الحجر واستبدالها بالخرسانة المقذوفة لتفادي تساقط الحجر تحت القوس عندما يكون معرضاً للسقوط. تستخدم هذه التقنية غالباً مع وجود شبكة تسليح.

يتم رش الخرسانة بسرعة كبيرة لتلصق بتأثير الصدم وتملأ الشقوق. تطبق الخرسانة بشكل طبقات تتراوح سماكتها بين (150–300 مم) ومدعمة عادة بشبكة تسليح. في جميع الحالات من الضروري إضافة تدعيم للركيزة لدعم القوس الخرساني، وذلك إما بإضافة مسند حجري إلى الركيزة الموجودة، أو تثبيت قاعدة معدنية تسند القوس الخرساني، أو

تأمين مسند ذاتي بإدخال القوس الخرساني بزاوية مشكلاً مسنداً داخل الحجر. الشكل (6-12).



الشكل (6-12) تقنية الخرسانة المقذوفة. (Beuerman, Thomas E. 2009) [8]

إن تقنية الخرسانة المقذوفة هي تقنية سريعة وبسيطة ولا تؤثر على خدمة الجسر أثناء تنفيذها، لكنها تسبب تعطل حركة السير قليلاً لمنع حدوث الاهتزازات في جسم الجسر. تكاليفها أقل من التقنيات الأخرى لكنها تسبب تغييراً في شكل الجسر لذلك ليست محبذة للاستخدام في الجسور ذات القيمة التراثية أو التاريخية.

ولذلك للحفاظ على شكل الجسر كما ذكرنا يمكننا الاستعاضة عن الخرسانة المقذوفة كما بقطع حجرية مماثلة للقطع المستخدمة في الجسر الأصلي. ويتم التدعيم بإضافة قوس حجري (بدلاً من القوس الخرساني) بالسماكة المطلوبة للتدعيم.

6-3- خاتمة

إن تقوية الجسور فن لا يمكن تعلمه من الكتب؛ يتطلب غالباً مهارة كبيرة للتوصل إلى حل قابل للتطبيق ومقبول من حيث التكلفة وملاءمة حالة الجسر وهو يستحق بذل مجهود لأنه يعطي الجسر فرصة جديدة للحياة. إن معظم الحلول المقترحة في هذا الفصل تناسب حالات تدعيم الجسور قبل انهيارها لحمايتها من الضرر كل حسب مكان حدوث الضرر والطريقة الأنسب من أجل تحسين سلوك الجسر.

في الفصل القادم سيتم وضع نموذج لجسر حجري وتطبيق أحمال ستاتيكية وديناميكية عليه ثم إجراء التحليل الانشائي، وعندها سنتأكد من دقة المعلومات النظرية التي تحدثنا عنها ومدى إمكانية مطابقتها للنموذج التحليلي.

الفصل السابع: برمجيات التحليل الإنشائي للجسور الحجرية (حالة دراسية–جسر قم غرز)

7-1- برمجيات التحليل الإنشائي للجسور الحجرية

إن الهدف من التطبيق العملي للدراسة هو معرفة الحالة الراهنة للجسر الحجري المدروس وقدرته على تحمل القوى الشاقولية والأفقية باستخدام البرامج الحاسوبية دون تعريض الجسر للأحمال من أجل الدراسة حرصاً على عدم إضعاف قدرة تحمله وحفاظاً عليه من الانهيار.

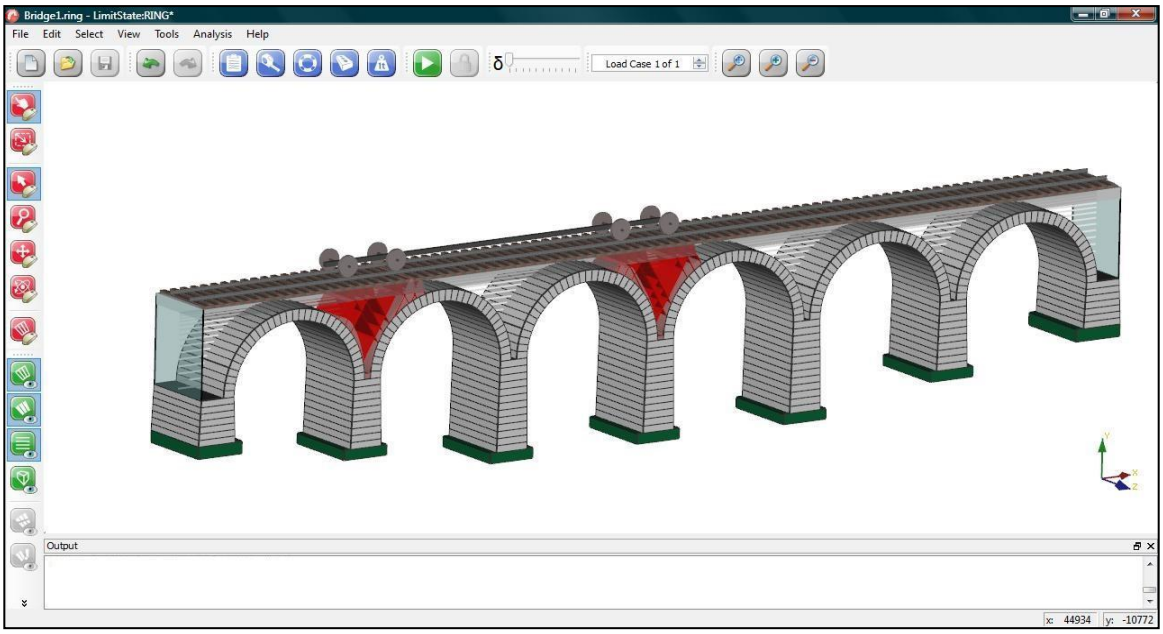
يوجد العديد من البرامج الحاسوبية التي تساعد على نمذجة وحساب وإيجاد نتائج المسائل الهندسية الإنشائية وغيرها على اختلاف أنواعها. كل من هذه البرامج له مجال تخصص وطريقة نمذجة تختلف باختلاف الهدف والنتيجة المراد الحصول عليها.

بداية تمت دراسة أولية بنمذجة الجسر باستخدام برنامج (RING3.1) لدراسته كما بالشكل (7–1). وهو برنامج متخصص بالجسور الحجرية القوسية (جسور السكك الحديدية والطرقات السريعة). نمذجته جاهزة وفق مبدأ العناصر المحدودة اللاخطية (Finite Element –Non Linear). مؤسسه (Dr.Matthew Gilbert) بريطاني الجنسية، وهو مهندس مدني متخصص بأبحاث الجسور الحجرية القوسية وتقييمها منذ عام 1990. (RING Manual. 2014) [23]

البرنامج مصمم لتحليل الجسور الحجرية المعرضة للقوى الشاقولية الممثلة بالوزن الذاتي والأحمال المتحركة (العربات القطارية والعادية) والقوى الأفقية (ممثلة بضغط التربة الجانبي على الركائز الطرفية).

كانت النتائج أن الجسر ينهار وبحاجة للتقوية. لكن الدراسة كانت محدودة لكون نمذجة البرنامج مغلقة وعدم تخصصه بالأحمال الديناميكية.

وكان استخدامه بنسخة تجريبية مما يحد من الصلاحيات المتوفرة للدارس.



الشكل (7–1) نموذج الجسر المدروس باستخدام برنامج (RING3.1)

البرنامج المستخدم في الدراسة والنتائج اللاحقة هو (LimitState:GEO 3.2.d). كانت النتيجة أن الجسر ينهار عند تعرضه للأحمال الأفقية التصميمية والأحمال الشاقولية والأفقية التصميمية معاً بتشكل المفاصل في الأقواس.

من الصعب مقارنة النتائج التفصيلية للدراسة الأولى مع الدراسة الحالية لأن أسلوب عمل البرنامجين مختلفين عن بعضهما البعض كما أن برنامج (GEO3.2) يتميز بإمكانية تفاعل التربة والمنشأ. لكن النتيجة العامة متماثلة وهي أن الجسر ينهار تحت تأثير الأحمال التصميمية.

إن برنامج (GEO3.2) برنامج إلكتروني مصمم لإجراء تحليل وإعطاء نتائج سريعة للحالة الحدية (أو حالة الانهيار) من أجل العديد من الحالات الهندسية التي تصمم باختيار الدارس مثل: المنحدرات، الجدران الاستنادية، الأساسات، الأوتاد، الأنفاق وأية حالة تجمع بين منشأ وتربة.

يحدد البرنامج مباشرة الحالة الحدية الحرجة (ULS: Ultimate Limit State) باستخدام تقنية تحليل حسابية حدية هي (DLO: Discontinuity Layout Optimization) وهي بالتعريف: عبارة عن استخدام تقنيات (Optimization) رياضية دقيقة جداً لتحديد

مجموعة نماذج وأنماط (Layout) من الخطوط غير المستمرة (Discontinuity) والتي تتشكل عند الانهيار. (GEO Manual. 2015) [24]

يعتمد البرنامج على نظرية اللدونة وهو مصمم أيضاً للعمل مع كودات تصميم حديثة مثل (Eurocode 7) لأنه مجهز بشكل كامل لإدخال المعاملات الجزئية المختلفة ويستطيع تحليل عدة سيناريوهات لإعطاء الحالة الأخطر بينها. تم تطوير تقنية (DLO) في جامعة شيفيلد الإنكليزية ويمكن أن تستخدم لتحديد ميكانيزم الانهيار الحرج التقليدي لأية حالة هندسية جيوتكنيكية.

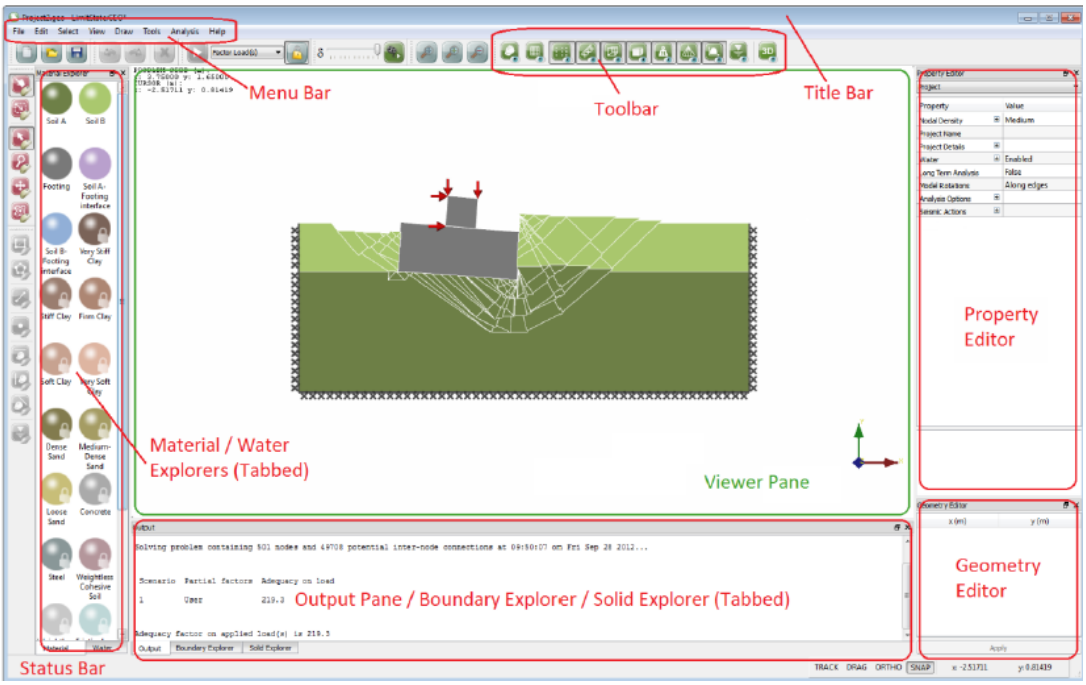
تظهر نتيجة تحليل أي مثال مدروس بشكل معامل يسمى معامل الكفاية (Adequacy Factor). وهو يعرف بأنه معامل تصعيد الأحمال أو معامل تخفيض مقاومة المادة الإنشائية حتى تحدث الحالة الحدية لانهيار المنشأ. وهو النسبة بين حمولة الانهيار والحمولة المطبقة (وهي في دراستنا الحمولة التصميمية).

يعطي البرنامج للمستخدم كامل السماحية للتحكم بمعامل الكفاية، يمكن حسابه من أجل القوى الخارجية، الوزن الذاتي، القوى الزلزالية، المواد... وعندما يتنج لدينا قيمة معامل الكفاية تساوي أكبر او تساوي الواحد هذا يعني أن المنشأ آمن على القوى المطبقة. فمثلاً من أجل تطبيق قوة خارجية قيمتها تساوي ($50\ Kn/m^2$) وقيمة معامل الكفاية الخاص بها محقق (حتى يقوم البرنامج بحسابه) يتنج بعد التحليل أن قيمة معامل الكفاية تساوي (2.4)، هذا يعني أن شدة القوة التي تسبب حدوث انهيار المنشأ تساوي حاصل ضرب القيمتين السابقتين أي ($50x2.4=120\ Kn/m^2$).

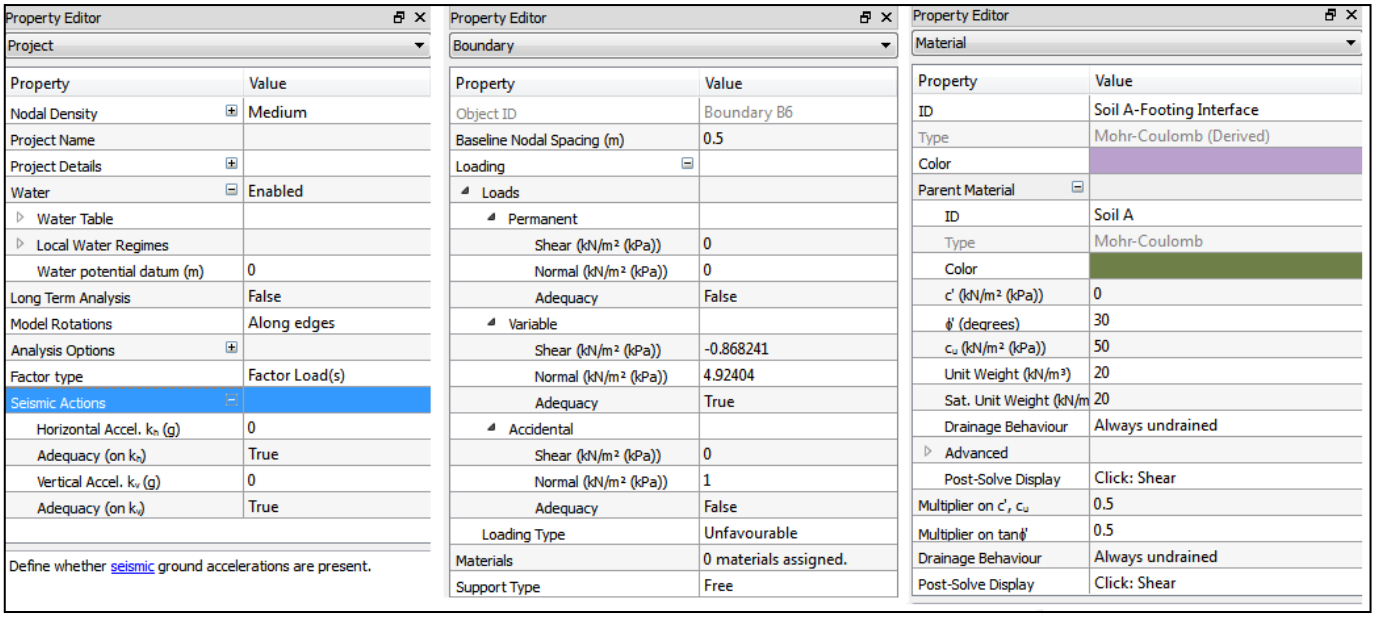
أما عند حساب معامل الكفاية من أجل مقاومة المواد فإن قيمة المعامل الناتجة تعبر عن مقدار تخفيض مقاومة المادة حتى يحدث الانهيار.

بيين الشكل التالي نافذة البرنامج ونموذج الجسر مع وجود أحمال شاقولية. يعطي البرنامج إمكانية واسعة للمستخدم للتحكم بكافة مدخلات البرنامج إذ من الممكن إدخال مواد جديدة بمواصفات مختارة من خلال (Material Explorer). نلاحظ أيضاً في الشكل (7-2) (Geometry Editor) الذي منه نستطيع معرفة إحداثيات العناصر وتعديلها.

ووجود (Property Editor) يستخدم لتعديل خصائص النمـــوذج ويبـــين الشـــكل (7–3) حالات مختلفة منه.



الشكل (7–2) نافذة برنامج (GEO) والتعريف بأدوات وشرائط المهام (GEO Manual. (2015) [24]



Property Editor — Project

Property	Value
Nodal Density	Medium
Project Name	
Project Details	
Water	Enabled
Water Table	
Local Water Regimes	
Water potential datum (m)	0
Long Term Analysis	False
Model Rotations	Along edges
Analysis Options	
Factor type	Factor Load(s)
Seismic Actions	
Horizontal Accel. k_h (g)	0
Adequacy (on k_h)	True
Vertical Accel. k_v (g)	0
Adequacy (on k_v)	True

Define whether seismic ground accelerations are present.

Property Editor — Boundary

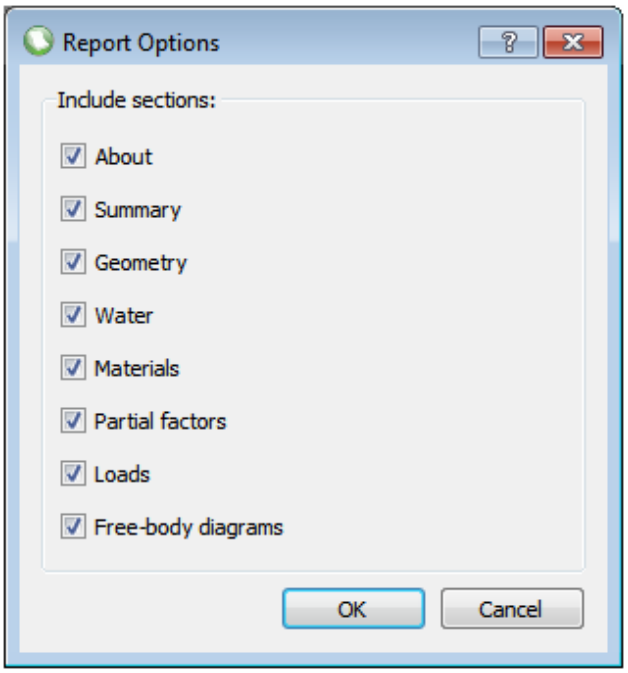
Property	Value
Object ID	Boundary B6
Baseline Nodal Spacing (m)	0.5
Loading	
Loads	
Permanent	
Shear (kN/m² (kPa))	0
Normal (kN/m² (kPa))	0
Adequacy	False
Variable	
Shear (kN/m² (kPa))	-0.868241
Normal (kN/m² (kPa))	4.92404
Adequacy	True
Accidental	
Shear (kN/m² (kPa))	0
Normal (kN/m² (kPa))	1
Adequacy	False
Loading Type	Unfavourable
Materials	0 materials assigned.
Support Type	Free

Property Editor — Material

Property	Value
ID	Soil A-Footing Interface
Type	Mohr-Coulomb (Derived)
Color	
Parent Material	
ID	Soil A
Type	Mohr-Coulomb
Color	
c' (kN/m² (kPa))	0
ϕ' (degrees)	30
c_u (kN/m² (kPa))	50
Unit Weight (kN/m³)	20
Sat. Unit Weight (kN/m	20
Drainage Behaviour	Always undrained
Advanced	
Post-Solve Display	Click: Shear
Multiplier on c', c_u	0.5
Multiplier on tanϕ'	0.5
Drainage Behaviour	Always undrained
Post-Solve Display	Click: Shear

الشكل (7–3) أمثلة عن حالات تحديد وتعديل خصائص النموذج. (GEO Manual. (2015) [24]

يتضمن تقرير النتائج المرفق بالبرنامج كل التفاصيل المتعلقة بالنموذج كما يوضح الشـــكل (7–4).



الشكل (7–4) نافذة تتضمن محتويات مخرجات البرنامج الموجودة في التقرير

7–2– خصائص برنامج (GEO 3.2)

7–2–1– معامل الكفايـــة ومعامـــل الأمـــان (Adequacy Factor and Factor of Safety):

يصنف معامل الأمان (Factor of Safety: FoS) المستخدم في الهندسة الجيوتكنيكية إلى معامل الأحمال (Factor on Load) ومعامل مقاومة المادة (Factor on Strength).

بشكل عام يكون أي تصميم معطى للدراسة مستقر ستاتيكياً وبعيداً عن الحالة الحدية. لذلك من أجل الحصول على تحليل الحالة الحديـــة (Ultimate Limit State: ULS) يجـــب توجيه نظام التحليل لينهار وفق معايير معينة. ويمكن تحقيق ذلك بشكل داخلي أو خارجي. من أجل معظم عمليات التحليل التقليدية يكون المعيار داخلي. أما من أجل التحليل الرقمـــي بشكل عام يجب أن يكون المعيار خارجي.

توجد ثلاثة طرق لتوجيه النظام إلى الحالة الحدية:

1–زيادة قيمة القوة الموجودة.

2-تخفيض مقاومة التربة.

3-إضافة قوة إضافية خارجية.

إن برنامج (LimitState:GEO) يقوم بإعطاء الحل مباشرة باستخدام الطريقتين الأولى والثانية بمبدأ معامل الكفاية. كما يعطي نسبياً بشكل مباشر قيمة معامل الأمان من أجل الطريقة الثالثة.

يعرف معامل الكفاية (Adequacy Factor:AF) بأنه المعامل الذي من خلاله يجب زيادة قيمة القوة المطبقة أو يجب إضعاف التربة الموجودة للوصول إلى حالة انهيار المنشأ. يوجد نوعين لمعامل الكفاية:

- معامل كفاية الأحمال.
- معامل كفاية المقاومة (للتربة).

بشكل عام: (AF) $\leq$ 1 فإن النموذج آمن على الانهيار.

(AF) > 1 فإن النموذج غير آمن وينهار.

وليس من الضروري إضافة هامش أمان للنتيجة المعطاة من البرنامج. يمكن أخذ هوامش أمان من أجل معاملات أخرى عند النمذجة لمواصفات مواد النموذج وتؤخذ كما هو مطبق في (Eurocode 7).

كذلك يمكن دراسة النموذج من أجل مراحل التشوهات. يستخدم (LimitState:GEO) نموذج صلب-لدن لسلوك المواد. إذا كان معامل الكفاية أكبر من الواحد فإنه لا يوجد حركة وإذا كان أصغر من الواحد فإن المنشأ يتنقل بدون حدود (لأنه يكون قد انهار).

الطريقة 1- معامل كفاية الأحمال (Factor of Safety on Loads)

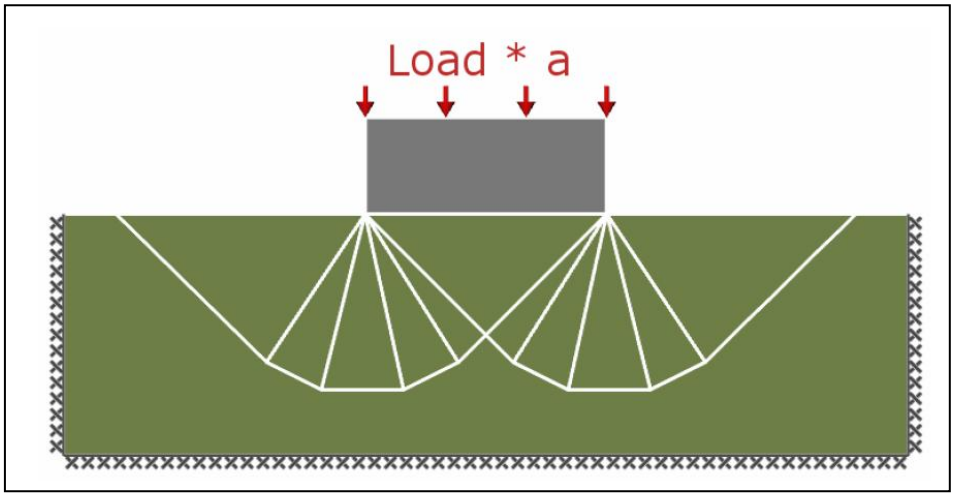
يُعبَّر عنه بالسؤال التالي:

"ما هو مقدار زيادة قيمة القوة المطبقة حتى يحدث الانهيار"

أو "ما هي قيمة المعامل (a) الذي يزيد قيمة الحمولة حتى يحدث الانهيار"

المعامل (a) هو معامل كفاية الأحمال المطبقة وهو القيمة التي يحدث الانهيار من أجلها بضربها بقيمة الحمل المطبق.

يمكن للمستخدم اختيار الحمل المطبق عليه (AF) من إعدادات الخصائص. وهذه الخاصة متوفرة لكل من الأحمال الخارجية، الوزن الذاتي للعناصر والتسارع الأرضي.



الشكل (7-5) معامل الأمان للأحمال (Method-1)

الطريقة 2- معامل الكفاية من أجل مقاومة المادة (Factor of Safety on Material (Strength

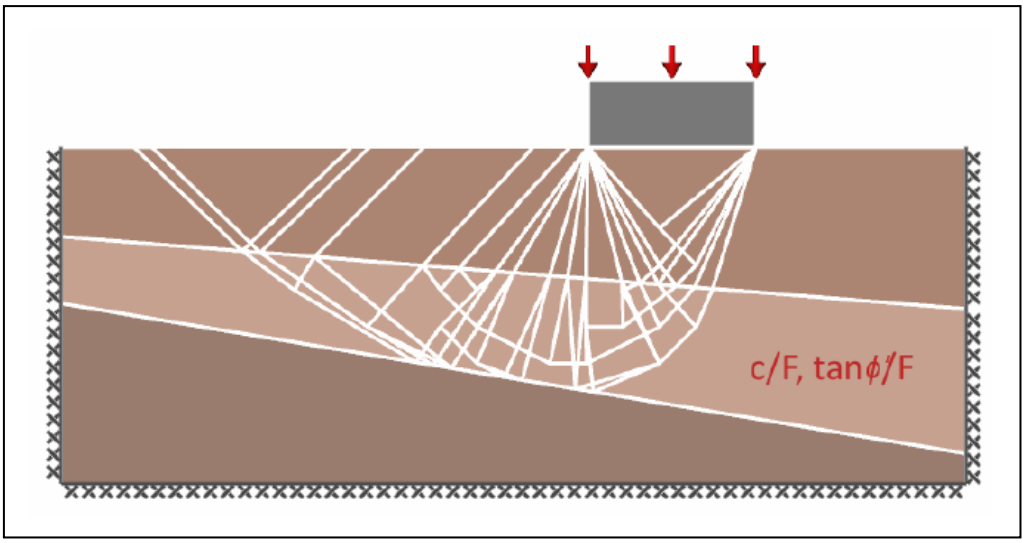
يُعبَّر عنه بالسؤال التالي:

"ما هو مقدار الضعف في التربة الذي من أجله يحدث الانهيار تحت تأثير الأحمال التصميمية"

أو "ما هي قيمة المعامل (F) الذي يخفض مقاومة التربة حتى يحدث الانهيار"

المعامل (F) هو معامل كفاية مقاومة المادة وهو القيمة التي يحدث الانهيار من أجلها بتقسيم مواصفات التربة عليها.

يمكن اختيار معامل كفاية المادة أو الأحمال من شريط المهام. فإذا اخترنا معامل كفاية الأحمال يكون (AF) هو نفسه (a)، أما إذا اخترنا معامل كفاية المقاومة يكون الناتج هو المعامل (F).



الشكل (7-6) معامل الأمان لمقاومة المادة (Method-2)

7-2-2- خصائص نماذج المواد:

يقدم (LimitState:GEO) للمستخدم مجموعة خيارات عند اختيار المواد تعتمد بشكل أساسي على مغلف انهيار مور-كولومب. تتضمن هذه الخيارات معظم أنواع الترب التي من الممكن أن توجد وكذلك يسمح بوجود العديد من المواد الإنشائية. كذلك وجود مادة احتكاكية ذات وزن معدوم ومقاومة على القص تسمح بصنع نموذج ذو سطح تماس صقيل (smooth) بين جسمين. كما يمكن وضع نماذج مواد مقعدة باستخدام تقنية أكثر من مادة (Multi-Material Technique).

يتوفر مع البرنامج مجموعة من المواد جاهزة المواصفات يمكن للمستخدم استخدامها كما هي أو تعديلها وهي ذات خصائص نموذجية حسب نوعها.

يمكن اختيار نموذج المادة مما يلي:

1- نموذج مور-كولومب القياسي مع تحديد مباشر للمعامل (C) وزاوية الاحتكاك (θ).
2- نموذج مور-كولومب المشتق حيث يكون المعامل (C) وزاوية الاحتكاك (θ) محددين مرجعياً لمادة أخرى من النموذج الأول.
3- نموذج مور-كولومب والتي من أجلها يكون المعامل (C) يتغير خطياً مع العمق.
4- نموذج مور-كولومب والتي من أجلها يكون المعامل (C) يتغير بشكل مكاني.
5- مادة تعمل على الشد و/أو الضغط.

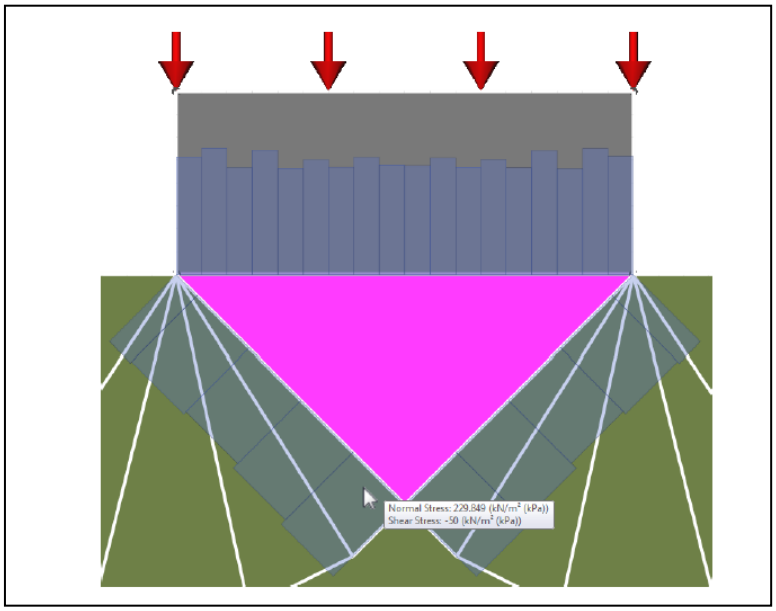
6-مادة صلدة.

7-عنصر إنشائي.

في دراستنا تم اختيار مادة التأسيس من النموذج الأول لأن قيم المعاملات معروفة لـــدينا. ومادة الحجر المستخدم في بناء الجسر من النموذج الخامس لأنه يعمل على الضغط.

7-2-3- الإجهادات وعزوم الانعطاف:

بعد إجراء تحليل للنموذج المدروس يمكن للمستخدم تحديد كـــل مـــن **العناصـــر الصـــلدة** (Solids) (العناصر الصلدة المحددة في ميكـــانيزم الانهيـــار) أو العناصـــر الهندســـية **(Engineered Elements)** في ميكانيزم الانهيار وذلك بالضغط على العنصر لمعرفـــة التفاصيل المتعلقة به. كما بالشكل (7-7).



الشكل (7-7) الإجهادات المتشكلة في جزء من التربة وفق ميكانيزم انهيار النموذج.

من أجل العناصر الصلدة: إن الضغط على العنصر سوف يظهر مخطط بياني للإجهـــادات الداخلية وإجهادات القص.

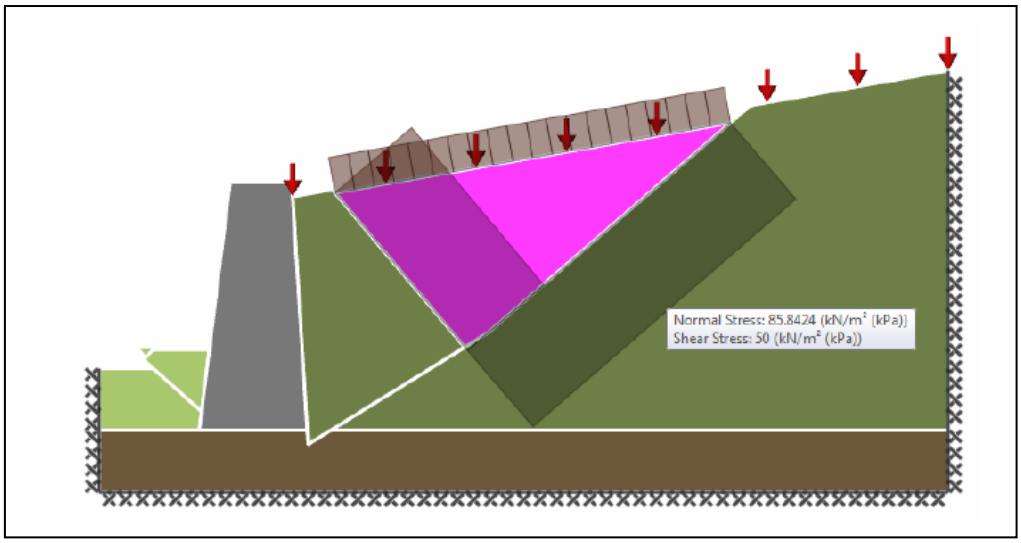
من أجل العناصر الهندسية: إن الضغط على العنصر سوف يظهر مخطط بياني لقوى الشد والقص وعزوم الانعطاف.

يمكن الحصول على هذه القيم من أجل أي عنصر من عناصر الجسر.

7-2-4- الضغط وتوزع القوة (Pressure and Force Distributions):

بعد الانتهاء من عملية التحليل والحصول على ميكانيزم الانهيار من الممكن إظهار توزع الضغط أو القوة حول الكتلة/العنصر الصلد لأية مادة أو حدود العنصر الهندسي. (المقصود بهذه الكتل/العناصر الصلدة هي الكتل التي تتشكل نتيجة الانهيار بين خطوط الانزلاق). كما بالشكل (7) ويتم الحصول عليها بالضغط على العنصر المختار.

يظهر التوزع بشكل أشرطة عريضة متجاورة حيث يعبر كل شريط عن مقدار معين للإجهاد أو القوة للعنصر في ميكانيزم الانهيار. يتم تحديد عرض الشريط حسب التباعد بين العقد في هذه المنطقة. ويتم التعبير عن قوى الضغط بقيم سالبة.



الشكل (7-8) مخطط توزع الضغط لجزء من التربة

7-2-5- كثافة العقد (Nodal Density):

يتم تحديد عدد العقد من خلال خاصية كثافة العقد (Nodal Density) وهذه الخاصية تتحكم بدقة الحل الناتج. تصنف إلى خشنة (250 nodes)، متوسطة (500 nodes)، ناعمة (1000 nodes)، ناعمة جداً (2000 nodes). وكذلك يمكن تحديد عدد بشكل يدوي من قبل المستخدم. ويجب الانتباه ألا يكون عدد العقد كبيراً جداً بحيث يسبب مشاكل أثناء التحليل.

عند تحديد الكثافة بشكل يدوي يوجد للمستخدم خيارين للتحكم بالكثافة:

1- **تحديد العدد (Target Number):** تحدد العدد الكلي للعقد التي سيستخدمها البرنامج عند التحليل. يقوم البرنامج بتحديد هذا العدد بشكل نسبة مئوية. وتعديل هذه القيمة يسبب تغيير معامل المقياس (Scale Factor) على التباعد العقد الفعلي (Baseline Nodal Spacing). وبالتالي يكون:

Actual Nodal Spacing = Baseline Nodal Spacing / Scale Factor

ملاحظة: يتم حساب (Actual Nodal Spacing) من قبل البرنامج لتحديد التباعد المطلوب بما يحقق (Target Number) ولا يمكن تعديله مباشرة من قبل المستخدم. كما أن تعديل (Target Number) يسبب تغييراً مباشراً على (Scale Factor).

2- **معامل المقياس (Scale Factor):** وهو معامل عالمي يستخدم لقياس (Baseline Nodal Spacing) بما يحقق الوصول إلى العدد المطلوب من العقد.

إن مضاغفة (Scale Factor) يسبب مضاعفة عدد العقد على طول محيط العنصر وبالتالي يجعل عدد العقد الموجودة في المساحة أربعة أضعاف.

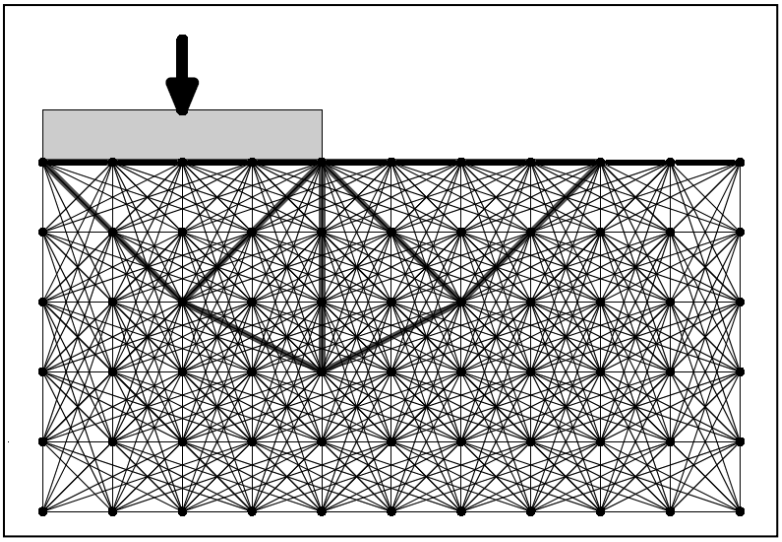
تحديد (Baseline Nodal Spacing):

يتم تحديد (Baseline Nodal Spacing) داخل العناصر الهندسية من خلال وتعديل الخصائص التالية للعنصر المطلوب:

تباعد العقد **لحدود العنصر:** وهو التباعد الأساسي على طول العنصر المحدد.

تباعد العقد الخطي **للعنصر الصلد:** وهو انتشار العقد من أجل التباعد على المحور (X) والتباعد على المحور (Y). وهو يحدد التباعد الأساسي لشبكة مستطيلة داخل العنصر الصلد ويقوم البرنامج بوضع هذه الشبكة داخل العنصر الصلد بشكل مناسب.

يوضح الشكل (7-9) توزع العقد داخل التربة وآلية عمل البرنامج لإيجاد خطوط الانزلاق الأخطر التي تسبب حدوث الانهيار.



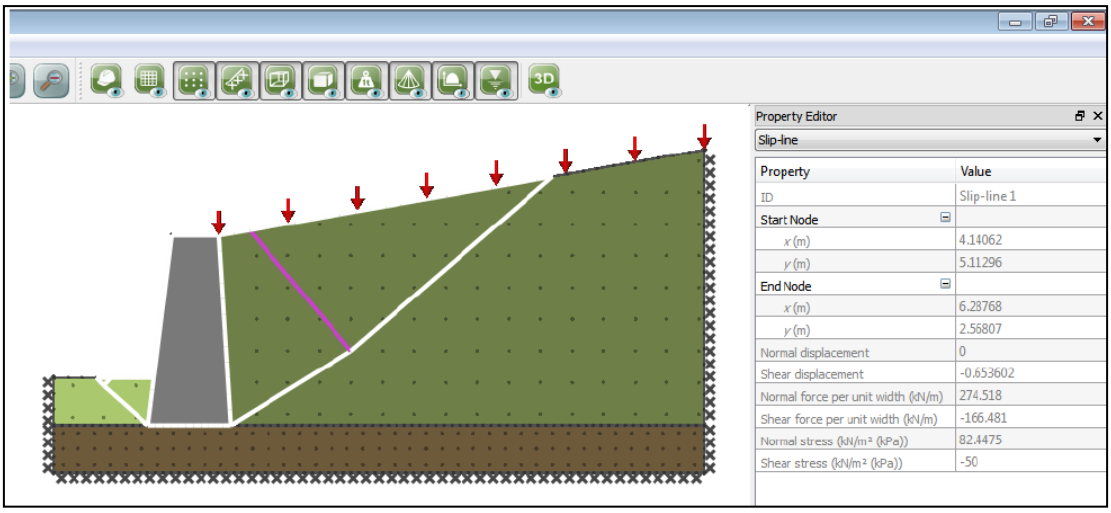
الشكل (7–9) تحليل (DLO) وكيفية إيجاد خطوط الانزلاق بالاعتماد على توزع العقد داخل التربة.

7–2–6– خطوط الانزلاق (Slip-lines):

بعد الانتهاء من عملية التحليل والحصول على ميكانيزم الانهيار يمكن معرفة المعلومـــات المتعلقة بخطوط الانزلاق، كل خط بشكل مستقل وهي كالتالي:

- الانتقالات الداخلية (Normal displacement).
- انتقالات القص (Stress displacement).
- القوى الداخلية (من أجل واحدة العرض) (Normal force).
- قوى القص (من أجل واحدة العرض) (Shear force).
- الإجهادات الداخلية (Normal stress).
- إجهادات القص (Shear stress).

هذه المعلومات تظهر في منطقة الخصائص كما بالشكل (7–10) من أجل أي خط انزلاق.



الشكل (7–10) خصائص خطوط الانزلاق

7–2–7– نمذجة الأحمال الزلزالية باستخدام DLO (Modeling of Seismic Loading Using DLO):

كما من أجل معظم عمليات التحليل المحدود فإن طريقة (DLO) يمكن أن تتعامل مع تسارع وهمي–ساكن (pseudo-static accelerations) بما يؤمن إجراء تحليل للمنشآت المعرضة لأحمال زلزالية. ويكون التسارع كما يلي:

K_h=horizontal acceleration/g

K_v=vertical acceleration/g

(g) تسارع الجاذبية الأرضي.

(K_h, K_v) معاملي التسارع الأفقي والشاقولي.

ثم يضاف تأثير القوى الذاتية ككتلة من وزن الجسم (W) (additional inertial body forces of magnitude) بمقدار (K_h.W) و (K_v.W).

الاتجاه الموجب لعمل المركبة الأفقية هو بالاتجاه السالب للمحور (X) (أي من اليمين إلى اليسار) والاتجاه الموجب لعمل المركبة الشاقولية هو بالاتجاه السالب للمحور (Y) (باتجاه الأسفل).

7-3- حالة دراسية-جسر قم غرز

الجسر المدروس في هذا البحث هو جسر قم غرز-الشكل (7-11)- يقع الجسر على وادي الزيدي – شرقي مدينة درعا وهو يحمل سكة الخط الحديدي الحجازي (باتجاه واحد فقط): دمشق – المدينة المنورة، على النقطة الكيلومترية (128).

لم نتمكن من إجراء زيارة ميدانية للجسر لذلك تمت الاستفادة في معرفة أبعاد الجسر وخصائص ومواصفات المواد من القياسات والتجارب المخبرية لعينات مأخوذة من الجسر من دراسات أعدت سابقاً (بوحلوفة، 2010) [2]. بيانات الجسر موضحة بالجدولين (7-1) و (7-2).

الشكل (7-11) منظر عام لجسر قم غرز.(بوحلوفة، 2010) [2]

الجدول (7-1): قيم أبعاد عناصر الجسر/الواحدة /mm/. (بوحلوفة، 2010) [2]

	الركائز		
	الأولى-السابعة	الثانية-السادسة	الثالثة-الرابعة-الخامسة
الارتفاع h_a	2100	4000	6000
العرض العلوي t_t	3500	1500	1500
العرض السفلي t_b	3500	2000	2000
عدد الأحجار n	7	13	20

الفتحات			
	الأولى–السادسة	الثانية–الخامسة	الثالثة–الرابعة
ارتفاع الفتحة h	3000	3000	3000
عرض الفتحة L	6000	6000	6000
سماكة القوس t	500	500	500
عدد أحجار القوس	33	33	33

الجدول (7–2): مواصفات المواد. (بوحلوفة، 2010) [2]

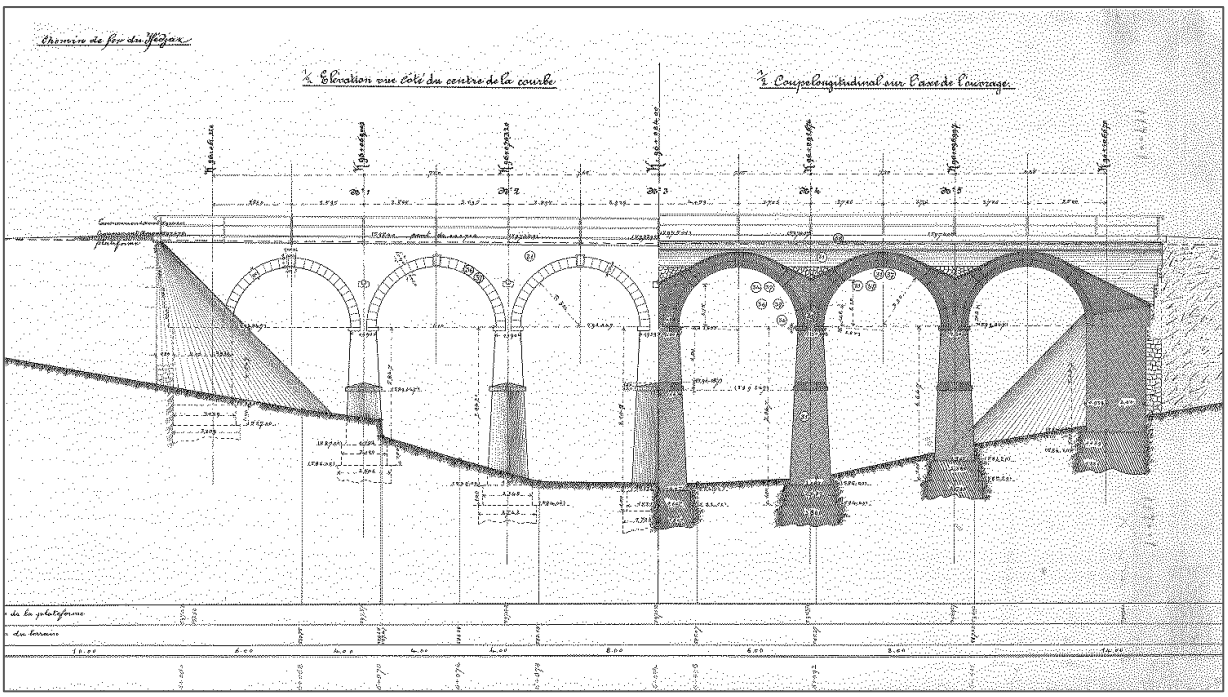
مواصفات الحجر – نوع الحجر بازلتي		
الوزن الحجمي Kn/m^3	معامل الاحتكاك μ	إجهاد الضغط Kg/cm^2
27.5	0.6	1068
معامل الاحتكاك الداخلي للقوس **μir**		زاوية الاحتكاك بين الحجر
0.577		30°

تربة الردم والتأسيس			
الوزن الحجمي الجاف Kn/m^3	الوزن الحجمي الرطب Kn/m^3	زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة °Φ	Cohesion C KPa
18.4	26.9	30	36

Soil-Arch Interface Properties	
Friction multiplier on Φ	Adhesion multiplier on C
0.66	0.5

المونة الرابطة المستخدمة هي مونة كلسية تؤمن تماسك القطع الحجرية بما يعادل وجـــود زاوية احتكاك داخلي بين الحجر تساوي (30°).

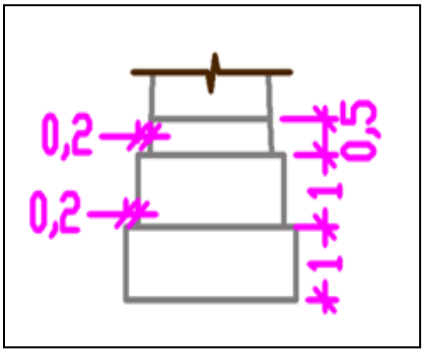
يبين الشكل (7-12) مخطط إنشائي لجسر حجري على الخط الحديدي الحجازي وبأبعاد قريبة جداً من أبعاد الجسر المدروس وباعتبار أن الدراسات السابقة لم تتضمن معلومات عن أساسات الجسر لذلك قمنا بافتراض أنها مماثلة لأساسات المخطط الموجود.



الشكل (7-12) مخطط إنشائي لجسر حجري على الخط الحديدي الحجازي [2]

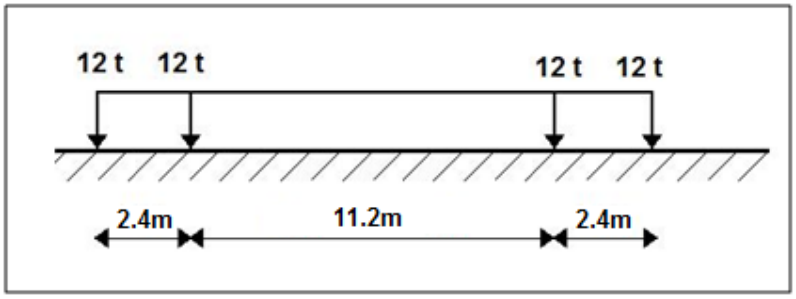
كما بالشكل (7-13) فإن أساسات الركائز تبدأ من عمق (50 سم) من سطح التربة وتكون الكتلة الأولى من الأساس بارزة عرضياً بمقدار (0.2 سم) من كل جهة وسماكة (1 متر) وذلك على طبقتين.

أخذت هذه القياسات من المخطط الإنشائي لجسر على الخط الحديدي الحجازي لعدم توفر معلومات خاصة عن أساسات الجسر المدروس تجديداً.



الشكل (7-13) أبعاد أساسات الركائز

العربة التصميمية للجسر هي عربة قطار ذات أربعة محاور موضحة بالشكل (4) وحمولتها المحورية (12 طن). [2]



الشكل (7−14) أبعاد وحمولة القاطرة

لإدخال تأثير العربة على البرنامج يجب تحويلها إلى حمولة موزعة على المتر المربع، حيث نوزعها على جزئين متساويين من أجل طول (2.4 م) ومن أجل متر عرضي هو عرض السكة. ومن أجل تصعيد الحمولة الحية بالمعامل الديناميكي بقيمة تساوي (1.4) تكون القيمة النهائية للحمولة الشاقولية الموزعة:

$$P = 1.4 \times \frac{2 \times 12 \times g}{2.4 \times 1} = 137.3 \ \mathrm{KN/m^2} \quad (1)$$

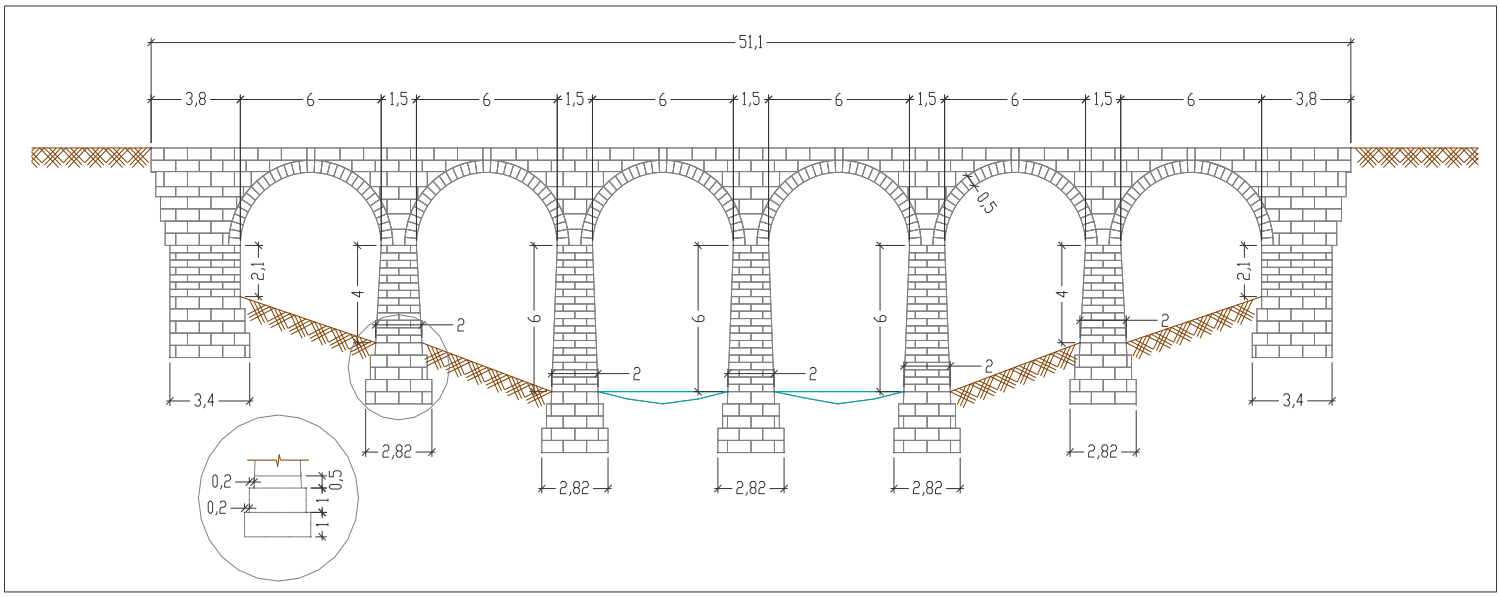
نلخص مراحل الدراسة كما يلي:

المرحلة الأولى: تحديد مكان وجود العربة على الجسر والذي ينتج عنه أخطر حمولة شاقولية تسبب حدوث ميكانيزم انهيار. ومنه ينتج لدينا منحني يعبر عن تغير مكان العربة (موقع البداية/طول الجسر) مع قيمة الحمولة الشاقولية المسببة للانهيار.

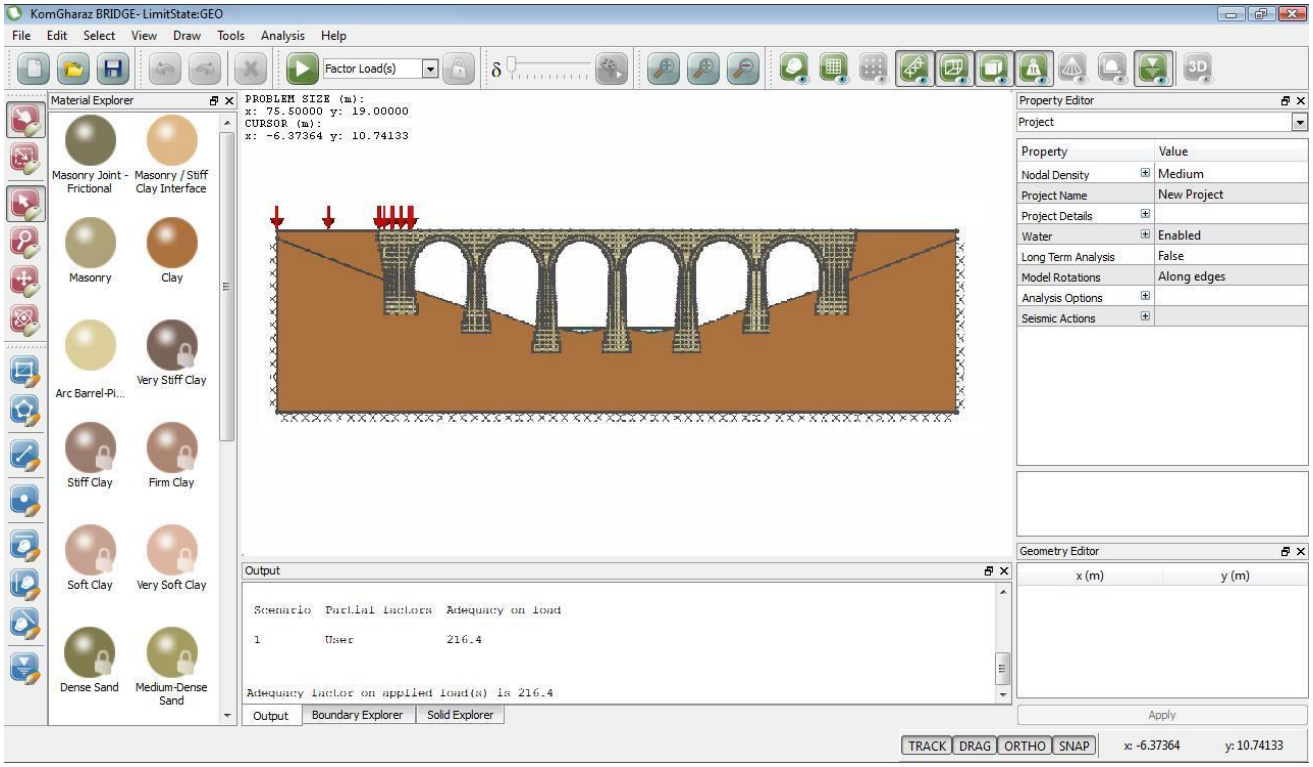
المرحلة الثانية: دراسة تحمل الجسر للأحمال الأفقية.

المرحلة الثالثة: دراسة تحمل الجسر من أجل تزامن وجود الأحمال الشاقولية والأحمال الأفقية.

المرحلة الرابعة: التدعيم.



الشكل (7-15) مخطط يبين أبعاد الجسر وتفصيلة الركيزة.



الشكل (7-16) نافذة البرنامج ونموذج الجسر مع وجود أحمال شاقولية.

7-4- مراحل الدراسة

7-4-1- **المرحلة الأولى:** تحديد المكان الأخطر للعربة

قبل البداية سوف نتأكد من استقرار الجسر المدروس.
قمنا بتحليل الجسر تحت تأثير وزنه الذاتي فقط ودون وجود تأثير أحمال خارجية. كانت النتيجة أن الجسر مستقر وأعطى البرنامج معامل كفاية مقداره (1.256).

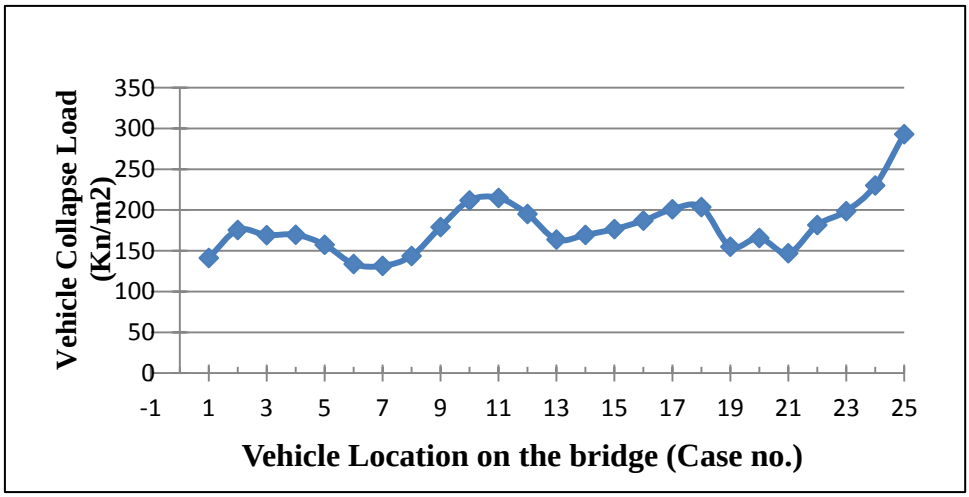
ملاحظة: يدخل الوزن الذاتي للجسر في الحسابات من أجل كافة حالات التحميل الخارجي.

من أجل تحديد المكان الأخطر لوجود العربة على الجسر (تحت تأثير الأحمال الشاقولية) سوف نقوم بتحريك العربة على الجسر بحيث يكون موقع بداية العربة بالنسبة لمجاز القوس عند (0 – 1/3 – 1/2 – 2/3) من كل قوس. ومنه ينتج لدينا منحني يعبر عن انتقال العربة على الجسر (أي تغير موقع بداية العربة بالنسبة لطول الجسر) مع قيمة الحمولة الشاقولية المسببة للانهيار. تظهر النتائج في الجدول (7-3) والشكل (7-17).

الجدول (7-3): قيم الحمولة الحدية لانهيار الجسر حسب تغير مكان وجود العربة.

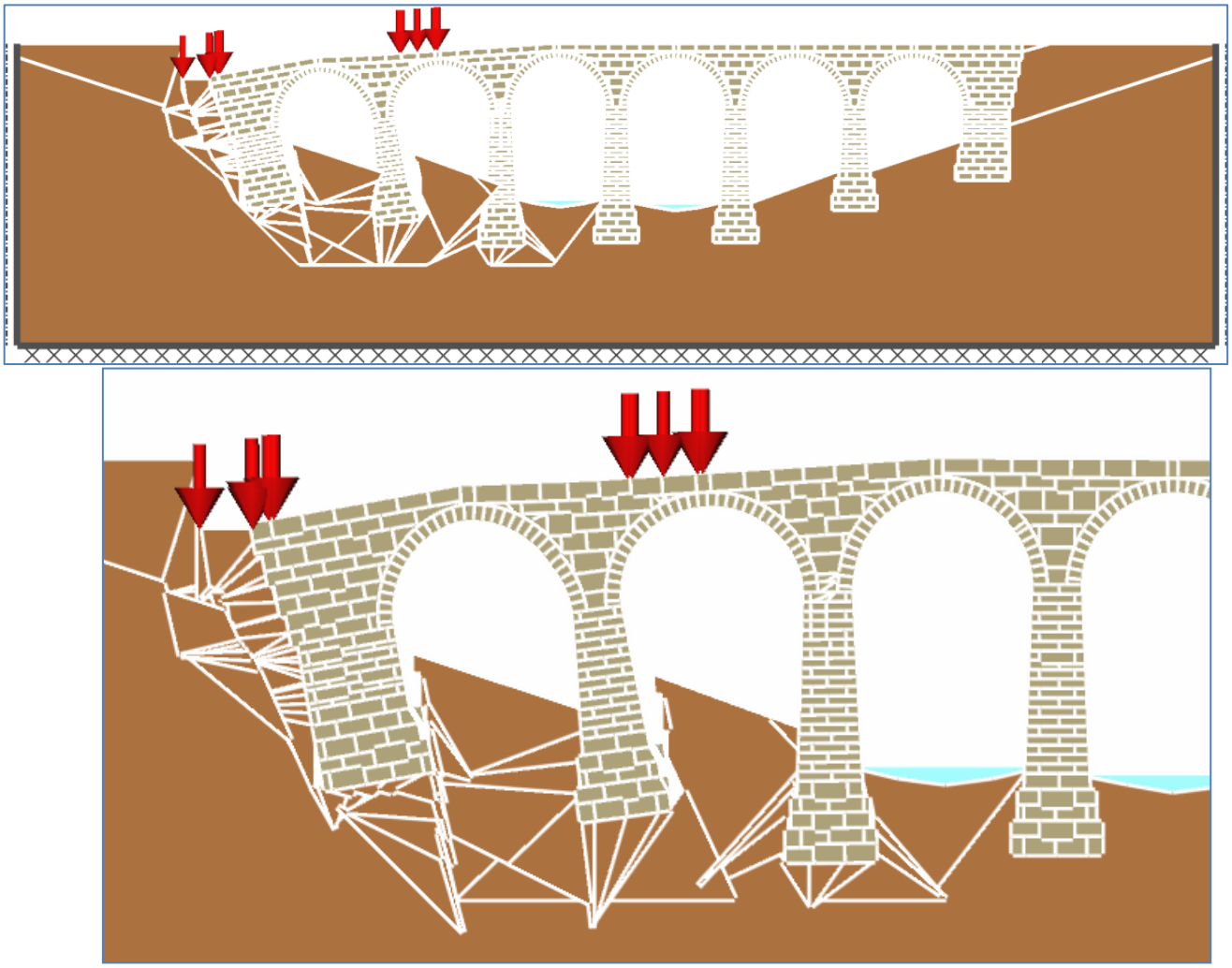
الحالة	مكان وجود العربة على الجسر	مكان وجود العربة على الجسر كنسبة مئوية من طوله	معامل الكفاية A.F	قيمة الحمولة Kn/m^2
1	بداية الفتحة الأولى	0.00	1.0284	141.2
2	ثلث الفتحة الأولى	0.05	1.2782	175.5
3	منتصف الفتحة الأولى	0.07	1.2323	169.2
4	ثلثي الفتحة الأولى	0.09	1.2360	169.7
5	منتصف الركيزة الثانية	0.16	1.1464	157.4
6	ثلث الفتحة الثانية	0.22	0.9745	133.8
7	منتصف الفتحة الثانية	0.24	0.9579	131.5
8	ثلثي الفتحة الثانية	0.26	1.0459	143.6
9	منتصف الركيزة الثالثة	0.33	1.3044	179.1

10	ثلث الفتحة الثالثة	0.39	1.5426	211.8
11	منتصف الفتحة الثالثة	0.41	1.5645	214.8
12	ثلثي الفتحة الثالثة	0.44	1.4210	195.1
13	منتصف الركيزة الرابعة	0.50	1.1930	163.8
14	ثلث الفتحة الرابعة	0.56	1.2345	169.5
15	منتصف الفتحة الرابعة	0.59	1.2862	176.6
16	ثلثي الفتحة الرابعة	0.61	1.3620	187
17	منتصف الركيزة الخامسة	0.67	1.4632	200.9
18	ثلث الفتحة الخامسة	0.74	1.4829	203.6
19	منتصف الفتحة الخامسة	0.76	1.1289	155
20	ثلثي الفتحة الخامسة	0.78	1.2068	165.7
21	منتصف الركيزة السادسة	0.84	1.0706	147
22	ثلث الفتحة السادسة	0.91	1.3227	181.6
23	منتصف الفتحة السادسة	0.93	1.4465	198.6
24	ثلثي الفتحة السادسة	0.95	1.6759	230.1
25	نهاية الفتحة السابعة/الأخيرة	1.00	2.1340	293



الشكل (7-17) قيم الحمولة الحدية لانهيار الجسر المقابلة لمكان وجود العربة وفق الجدول (7-3).

نستنتج من الجدول السابق أن أخطر مكان للحمولة هو ما يقابل القيمة الأصغر التي ينهار عندها الجسر، وهي تساوي ($131.5\ \ Kn/m^2$) من أجل الحالة رقم (7) كما يظهـــر بالشكل (7-18).



الشكل (7-18) الحالة الحدية الأخطر للانهيار تحت تأثير الأحمال الشاقولية التصميمية.

وبالتالي فإن الجسر ينهار بوضعه الحالي تحت تأثير الأحمال الشاقولية التصـــميمية لأن معامل الكفاية أصغر من الواحد.

حصل ميكانيزم الانهيار بسبب تأثير القوى الشاقولية على الركيزة الطرفية مسبباً ضـــغطاً عليها مما أدى لهبوطها.

يتضمن الملحق /2/ الأشكال الحدية للانهيار من أجل جميع الحالات المذكورة في الجـــدول (7-3).

7-4-2- المرحلة الثانية: دراسة تحمل الجسر للأحمال الأفقية

يتم في البرنامج إدخال تأثير الزلازل باستخدام معاملات التسارع والتي هي نسبة من التسارع الأرضي الأفقي كما بالعلاقات التالية: (الكود العربي السوري، 2005) [5]

$$k_h = \frac{a_h}{g} \quad (2) \quad , \quad k_v = \frac{a_v}{g} \quad (3) \quad , \quad k_v = (\frac{1}{2} - \frac{2}{3})k_h \quad (4)$$

حيث:

$g=9.815 m/s^2$ التسارع الأرضي.

a_h, a_v تسارع التربة أفقياً نتيجة الزلزال وهو نسبة من تسارع الجاذبية الأرضي.

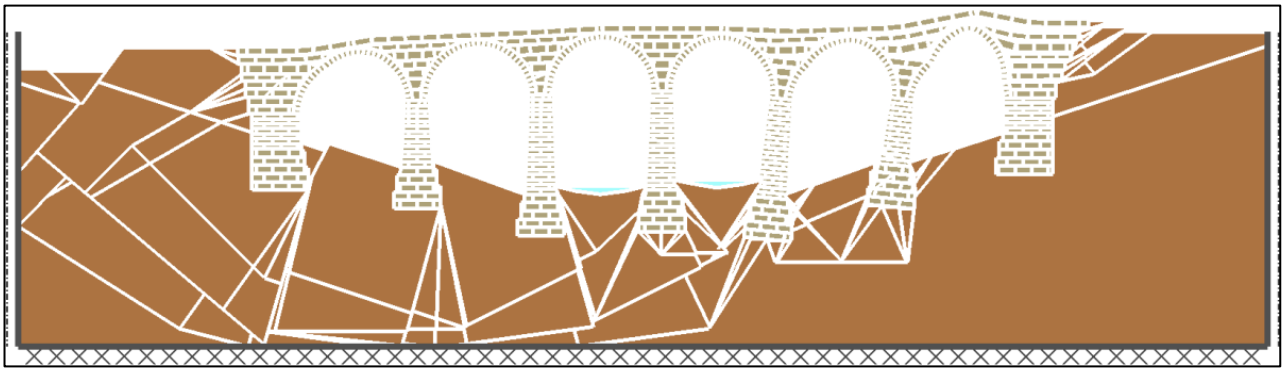
K_h, K_v نسبة التسارعات الأفقية والشاقولية من التسارع الأرضي.

يقع الجسر المدروس في منطقة درعا والتي من أجلها يكون التسارع الأفقي للزلزال التصميمي يساوي ($a_h=250\ cm/s^2$) (الكود العربي السوري، 2005) [5].

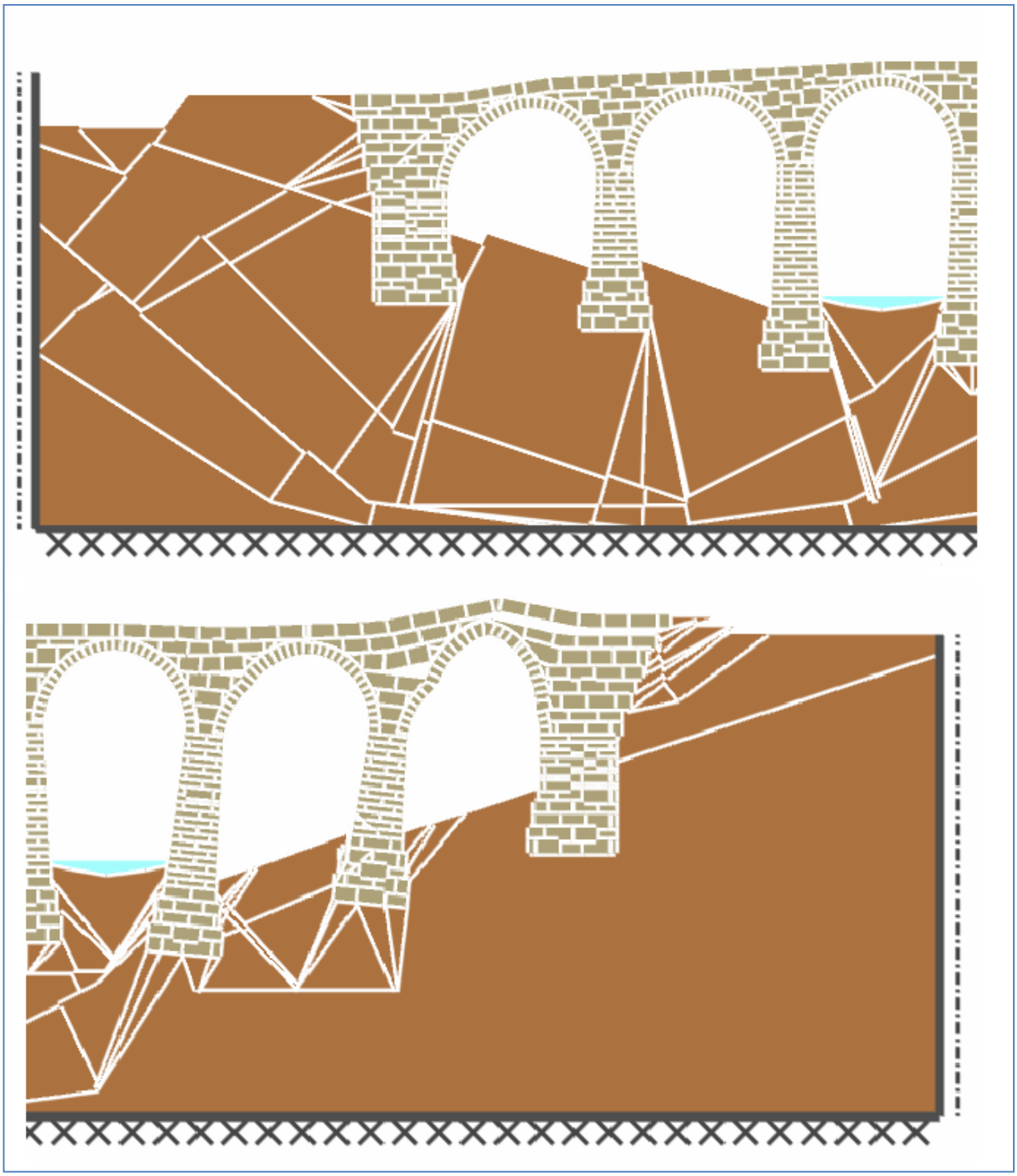
ومنه تأخذ المعاملات السابقة القيم التالية:

$$K_v=0.15 \quad , \quad K_h=0.255$$

عند تحليل نموذج الجسر وجدنا أن قيمة معامل الكفاية للتسارع الأرضي الحدي للانهيار الذي يتحمله الجسر يساوي (A.F=0.5353)، أي ما يقابل ($K_h= 0.1365$, $a_h=133.7\ cm/s^2$). ومنه نستنتج أن الجسر ينهار عند تعرضه للزلزال التصميمي. يظهر في الشكل (7-19) ميكانيزم انهيار الجسر.



الشكل (7-19) ميكانيزم انهيار الجسر تحت تأثير القوى الأفقية



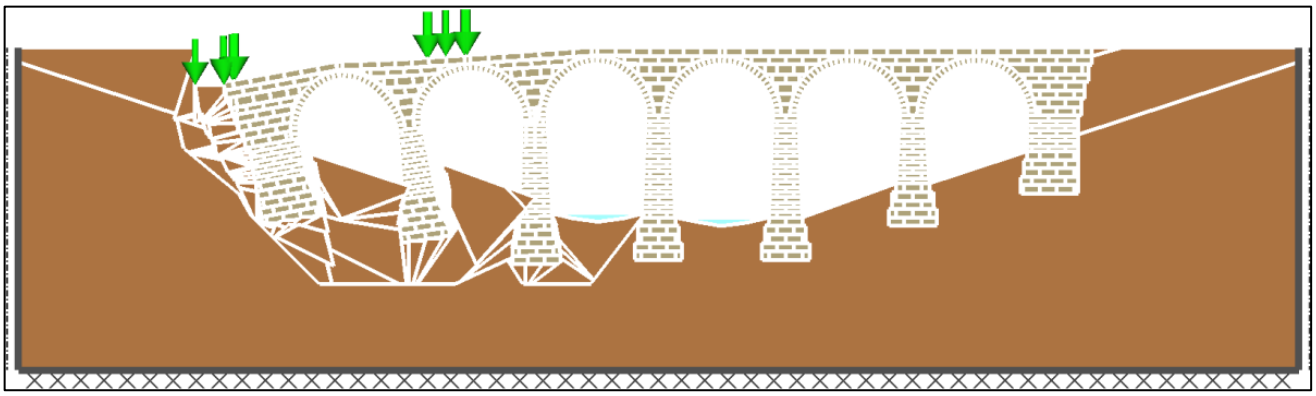
الشكل (7-19-1) تفصيل ميكانيزم انهيار الجسر تحت تأثير القوى الأفقية

نلاحظ أن الانهيار حدث بسبب هبوط الركيزتين الأولى والثانية وحدوث دوران في الركيزتين الخامسة والسادسة وتشكل مفاصل في الفتحة الأخيرة.

7-4-3- المرحلة الثالثة: تزامن الحمل الديناميكي والشاقولي

قمنا بدراسة الجسر من أجل تزامن وجود العربة في الموقع الأخطر (نتيجة المرحلة 1) بالحمولة التصميمية ($137.3\ Kn/m^2$) مع وجود الزلزال التصميمي للمنطقة ($k_h=0.255$) دون تدعيم فنتج أنه عند تعرض الجسر لأحمال شاقولية تساوي الأحمال التصميمية انهار الجسر من أجل معامل كفاية للأحمال الزلزالية يساوي (A.F=0.1899) وهو يعطي نتيجة أقل بكثير من القيمة التصميمية.

يبين الشكل (7-20) ميكانيزم انهيار الجسر الموافق لهذه الحالة.



الشكل (7-20) ميكانيزم انهيار الجسر تحت تأثير القوى الشاقولية والأفقية

مما سبق نجد أنه يجب تدعيم الجسر حتى يقاوم كلاً من الأحمال الشاقولية والأفقية من جهة ويقاوم تزامن الحمل الشاقولي والأفقي معاً.

7-4-4- المرحلة الرابعة: التدعيم

كما ورد ضمن الفصل السادس يوجد العديد من أساليب تدعيم الجسور ولكل أسلوب إيجابيات وسلبيات. سوف نقوم باستخدام عدة طرائق لتدعيم الجسر المدروس ومقارنة نتائج التدعيم لمعرفة الطريقة الأنسب.

الطرائق هي:

1- **تدعيم التربة:** لأن ميكانيزم الانهيار لكافة الحالات كان بحدوث هبوط واضح في التربة أسفل الركائز لذلك من المناسب تقوية التربة لرفع قيمة معامل كفاية الجسر وزيادة تحمله للأحمال الخارجية.
2- **حقن المواد الرابطة في القوس:** أعطى ميكانيزم الانهيار تشكل مفاصل في الأقواس لذلك من الجيد تقوية ارتباط عناصر القوس مع بعضها (أي القطع الحجرية) لزيادة قدرة تحمل الجسر.
3- **التدعيم بزيادة عرض الركائز.**

7-4-4-1-التدعيم بحقن التربة:

تعددت المواد المستخدمة لحقن التربة الضعيفة من أجل تقويتها ورفع كفاءتها للتقليل من الهبوطات التي تحدث فيها. من المواد المستخدمة راتنجات الإيبوكسي، محاليل السيليكات، البوليميرات، البنتونيت، الاسمنت. (Ryall, Mike. 2001)[28]

من القيم المتغيرة لدينا للتعبير عن تدعيم التربة هي زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة ومعامل التماسك. وتعرف كما يلي: (Swiss Standard) [30]، (Minnesota Department of Transportation. 2007) [26]

زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة (θ) هي معامل مقاومة الترب للقص. تُعرف من منحني مور-كولومب وتستخدم لتوصيف مقاومة احتكاك القص للترب مع الإجهاد الفعال. تقاس

بالدرجات وتختلف قيمتها حسب كثافة التربة المستخدمة إذ تتراوح قيمها بين الصفر للرمل ومن الممكن أن تصل إلى (50°) من أجل الترب ذات الكثافة العالية.

معامل تماسك التربة (C_u): وهو مصطلح يستخدم لوصف مقاومة التربة للقص. يؤخذ تعريفه من معيار مور–كولومب ويستخدم لوصف الجزء غير الاحتكاكي لمقاومة القص وهو مستقل عن الإجهاد الطبيعي.في مستوي إجهاد القص الإجهاد–إجهاد القص الطبيعي معامل التربة هو الجزء المحدد بين محور القص لخط مقاومة القص وفق مور–كولومب.

تختلف قيمته حسب نوع التربة ومن الممكن أن تصل إلى القيمة (105) من أجل ترب الغضار السيلتي المضغوط.

a) التدعيم من أجل تزامن الأحمال الشاقولية والأفقية:

قمنا في الدراسة من أجل تزامن الأحمال الأفقية والشاقولية بتغيير قيمة كل من زاوية الاحتكاك ومعامل التماسك من أجل تطبيق حمولة شاقولية تصميمية ($137.3\ Kn/m^2$) للحصول قيمة معامل الكفاية الزلزالي. وكانت النتائج كما بالجدول التالي:

الجدول (7–4) قيم معامل الكفاية الزلزالي عند وجود الحمولة الشاقولية التصميمية من أجل تغيير زاوية الاحتكاك ومعامل التماسك للتربة.

الحالة	زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة θ°	معامل التماسك C_u (KPa)	معامل الكفاية A.F
1	25	36	0.1899
2	30	36	0.1899
3	35	36	0.1899
4	40	36	0.1899
5	25	40	0.5371
6	30	40	0.5371
7	35	40	0.5371
8	30	45	0.7438

0.7438	45	40	9
0.931	50	30	10
1.001	52	30	11
1.104	55	30	12
1.271	60	30	13

نجد من الجدول السابق أن تغيير قيمة زاوية الاحتكاك لم يغير من النتائج بينما أثر معامل التماسك بشكل إيجابي على مقاومة الجسر للأحمال.

وبالتالي يجب تقوية تربة التأسيس حتى تصل قيمة معامل التماسك إلى القيمة (C_u=52 KPa) والتي من أجلها يصبح الجسر آمناً من أجل الأحمال التصميمية. ويمكن زيادة هذا العامل إلى القيمة (C_u=60 KPa) لتحقيق معامل أمان للجسر يساوي (1.271).

أشكال الانهيار الموافقة للجدول (7-4) موجودة في الملحق /3/. حيث نلاحظ أن شكل الانهيار يتغير بشكل ملحوظ إذ ينقص مقدار هبوط التربة مع زيادة قيمة معامل التماسك.

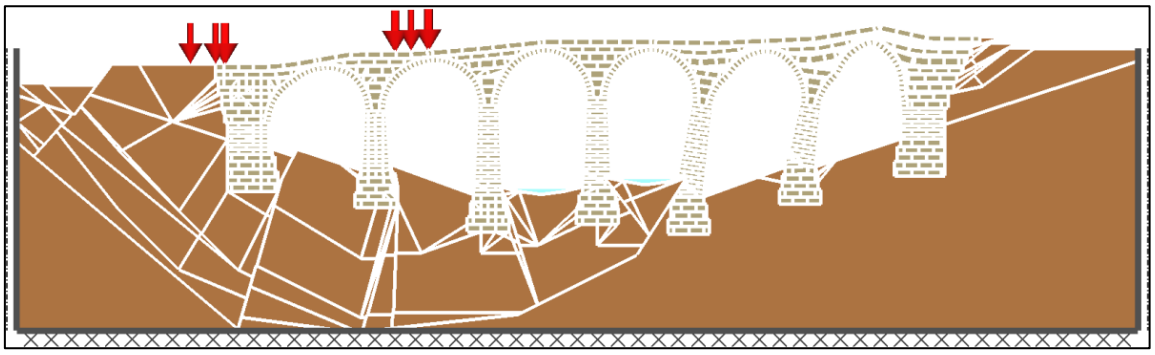
قمنا بإجراء دراسة للتأكد من قيم تدعيم التربة من أجل تعرض الجسر للزلزال التصميمي فكانت النتائج كما بالجدول (7-5).

الجدول (7-5) قيم معامل كفاية الأحمال الشاقولية عند وجود الزلزال التصميمي من أجل تغيير زاوية الاحتكاك ومعامل التماسك للتربة.

معامل الكفاية A.F	معامل التماسك C_u (KPa)	زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة θ	الحالة
0.3359	50	30	2
0.6771	51	30	3
1.0102	52	30	4

نستنتج أن معامل التماسك (C_u=52 KPa) يحقق أمان الجسر عند تزامن الأحمال الشاقولية والأفقية التصميمية.

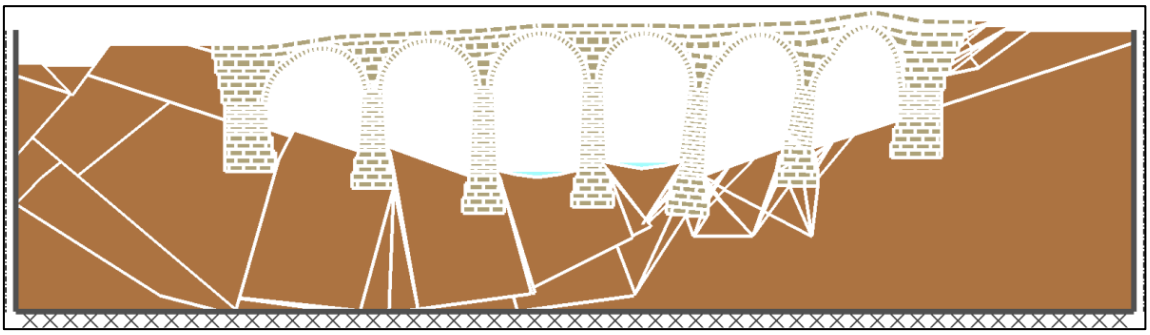
أشكال الانهيار الموافقة للجدول (7-5) متماثلة من أجل القيم المدروسة لأن تغيير قيمة معامل التماسك يغير من قيمة معامل الكفاية ولا يؤثر على شكل الانهيار. وتظهر كما بالشكل (11).



الشكل (7-21) ميكانيزم الانهيار عند تعرض الجسر لحمولة شاقولية متغيرة والزلزال التصميمي من أجل تغيير زاوية الاحتكاك ومعامل التماسك للتربة

b) التدعيم من أجل مقاومة الأحمال الأفقية:

عند تعرض الجسر للأحمال الزلزالية فقط كانت النتائج كما بالجدول (6) وأشكال الانهيار المرافقة متماثلة من أجل القيم المدروسة كما بالشكل (12) لأن تغيير قيمة معامل التماسك يغير من قيمة معامل الكفاية ولا يؤثر على شكل الانهيار.



الشكل (7-22) ميكانيزم الانهيار عند تعرض الجسر لقيم زلزالية متغيرة من أجل تغيير زاوية الاحتكاك ومعامل التماسك للتربة

الجدول (7–6) قيم معامل الكفاية الزلزالي للجسر من أجل تغيير معامل التماسك للتربة.

الحالة	زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة θ°	معامل التماسك C_u (KPa)	معامل الكفاية A.F
1	30	36	0.5353
2	30	40	0.6817
3	30	45	0.8588
4	30	50	1.033
5	30	52	1.102
6	30	55	1.205
7	30	60	1.37

c) التدعيم من أجل مقاومة الأحمال الشاقولية:

عند تعرض الجسر للأحمال الشاقولية فقط كانت النتائج كما بالجدول (7) وأشكال الانهيار المرافقة متماثلة من أجل القيم المدروسة كما بالشكل (13) لأن تغيير قيمة معامل التماسك يغير من قيمة معامل الكفاية ولا يؤثر على شكل الانهيار.

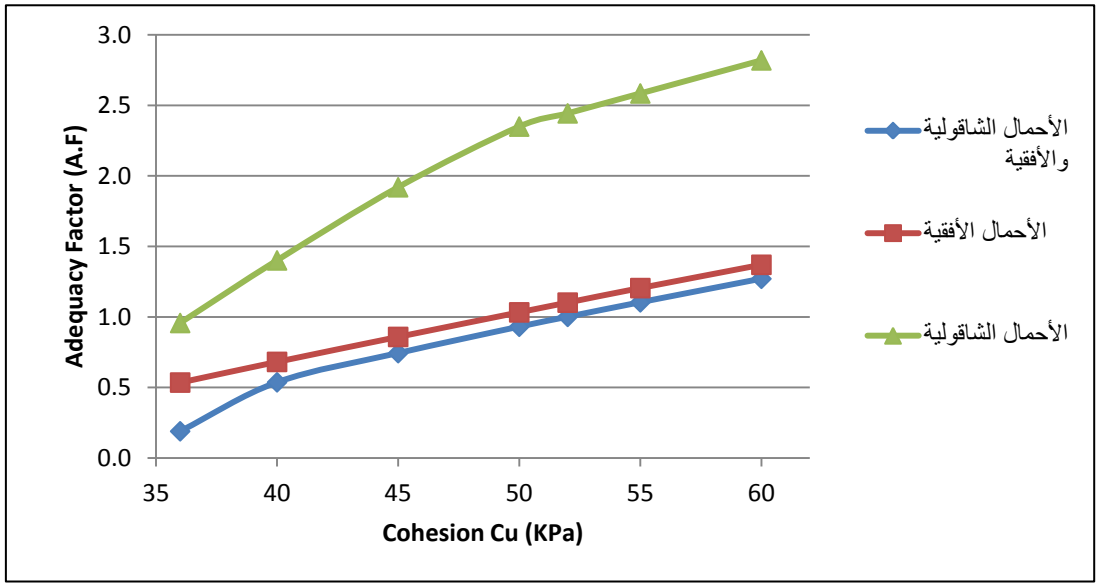
الجدول (7–7) قيم معامل الكفاية للأحمال الشاقولية للجسر من أجل تغيير معامل التماسك للتربة.

الحالة	زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة θ°	معامل التماسك C_u (KPa)	معامل الكفاية A.F
1	30	36	0.9579
2	30	37	1.07
3	30	40	1.401

1.92	45	30	4
2.35	50	30	5
2.4436	52	30	6
2.5848	55	30	7
2.8193	60	30	8

نلاحظ من الشكل (7-23) أن تحمل الجسر للأحمال الخارجة سواء كانت أفقية أو شاقولية أو كليهما يتناسب طرداً مع رفع كفاءة التربة ويعطي قيماً جيدة إذ من الممكن تحقيق معامل أمان للجسر.

نستنتج مما سبق أن التدعيم بطريقة رفع كفاءة التربة فعالة لرفع أداء الجسر لمقاومة الأحمال المطبقة عليه وذلك من أجل أن تكون قيمة معامل تماسك التربة تساوي (C_u=52 KPa) بحيث يكون الجسر آمناً لمقاومة الأحمال التصميمية.



الشكل (7-23) العلاقة بين رفع كفاءة التربة وتغير معامل الكفاية عند تعرض الجسر للأحمال الخارجية.

7-4-4-2-التدعيم بحقن المواد الرابطة في القوس:

قمنا بإجراء تحليل للجسر تحت تأثير الأحمال الأفقية والشاقولية من أجل تغيُّر التماسك بين أجزاء القوس. بداية أجرينا التحليل من أجل قيم أقل من القيمة التصميمية على افتراض وجود تراجع في أداء المونة الرابطة مع الزمن أو تدهور حالتها. ثم درسنا القيم من أجل تماسك أكبر يعبر عن تدعيم القوس بالحقن.

a) من أجل الأحمال الزلزالية:

الجدول (7-8) قيم معامل الكفاية للمعامل الزلزالي الأفقي للجسر من أجل تغيير معامل التماسك للتربة.

الحالة	معامل التماسك C_u (KPa)	معامل الكفاية A.F
1	5	0.4415
2	10	0.4784
3	15	0.499
4	20	0.5138
5	25	0.5251
6	30	0.5353
7	35	0.5462
8	40	0.5579
9	45	0.5701
10	50	0.5815
11	70	0.6105
12	80	0.6128
13	89	0.6161

نجد من الجدول السابق أن زيادة التماسك بين أحجار القوس لا يساهم في تحسين أداء الجسر لمقاومة الأحمال الأفقية لأن قيمة معامل الكفاية بقيت أقل من الواحد.

b) من أجل الأحمال الشاقولية:

الجدول (7-9) قيم معامل الكفاية للأحمال الشاقولية من أجل تغيير معامل التماسك للتربة.

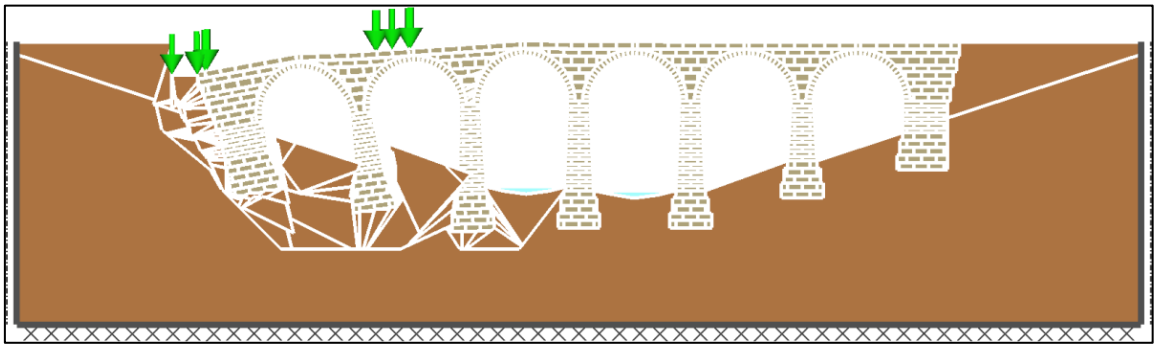
الحالة	معامل التماسك C_u (KPa)	معامل الكفاية A.F
1	5	0.8535
2	10	0.9253
3	15	0.9403
4	20	0.9451
5	25	0.9495
6	30	0.955
7	35	0.9624
8	40	0.9717
9	45	0.9817
10	50	0.9908
11	55	0.9963
12	60	1

نلاحظ من الجدول السابق أن قيمة معامل الكفاية تتزايد تدريجياً مع زيادة التماسك بين الحجر ولكن التزايد بطيء جداً حتى يصل معامل الكفاية إلى الواحد من أجل احتكاك بين الحجر يساوي (60°).

c) من أجل تزامن الأحمال الشاقولية والزلزالية:

وجدنا عند دراسة قيم معامل الكفاية الزلزالي عند تطبيق الحمولة الشاقولية التصميمية المقابلة لتغير التماسك في الأقواس أن قيم معامل الكفاية تبقى صغيرة جداً من أجل تماسك كبير بين الأقواس.

يبين الشكل (14) شكل الانهيار المرافق للحالات السابقة في الجدول (7-7) وهي متماثلة لأن تغيير قيمة معامل التماسك يغير من قيمة معامل الكفاية ولا يؤثر على شكل الانهيار.



الشكل (7-24) ميكانيزم الانهيار عند تعرض الجسر لقيم زلزالية متغيرة وحمولة شاقولية تصميمية من أجل تغيير التماسك في الأقواس.

نستنتج مما سبق أعلاه أن التدعيم بطريقة حقن الأقواس غير فعالة لتدعيم الجسر.

7-4-4-3-التدعيم بزيادة عرض الركائز:

a) من أجل الأحمال الشاقولية:

الجدول (7-10) قيم معامل الكفاية للأحمال الشاقولية من أجل التدعيم بزيادة عرض الركيزتين الطرفيتين.

الحالة	سماكة التدعيم cm	معامل الكفاية A.F
1	20	0.8231
2	40	0.8075

3	60	0.7891
4	80	0.7726
5	100	0.7517

نلاحظ أن التدعيم غير فعال بهذه الطريقة لأن معامل الكفاية يتناقص مع زيادة سماكة التدعيم كما أن قيمته أقل من الواحد أي لا يحقق أمان الجسر.

b) من أجل الأحمال الأفقية:

الجدول (7-11) قيم معامل الكفاية للمعامل الزلزالي الأفقي من أجل التدعيم بزيادة عرض الركيزتين الطرفيتين.

الحالة	سماكة التدعيم cm	معامل الكفاية A.F
1	20	0.3429
2	40	0.3263
3	60	0.3263
4	80	0.3263
5	100	0.3263

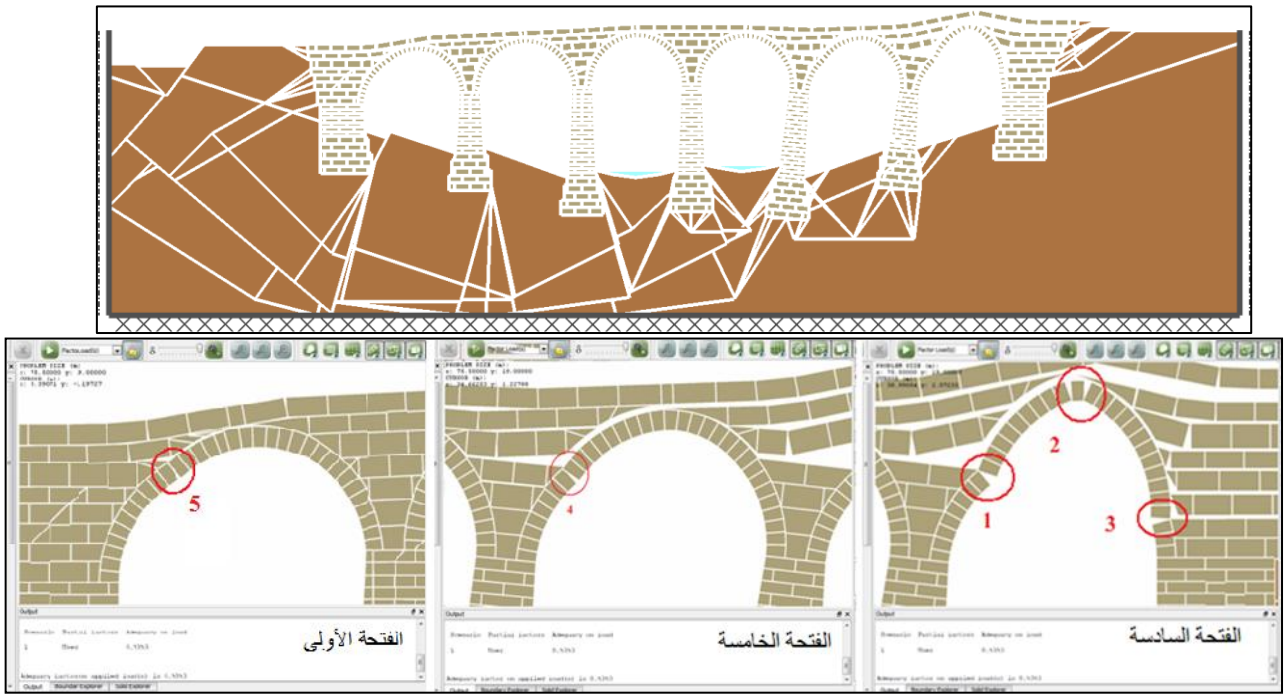
نستنتج أن التدعيم غير فعال بهذه الطريقة لأن معامل الكفاية انخفض ثم ثبت مع زيادة سماكة التدعيم كما أن قيمته أقل من الواحد أي لا يحقق أمان الجسر.

7-5- دراسة قيم القوى الداخلية

من أجل الدراسة سوف نختار دراسة قيم القوى الداخلية لنقاط محددة (كما سيرد) ويمكن التطرق لقيم أخرى في دراسات لاحقة.

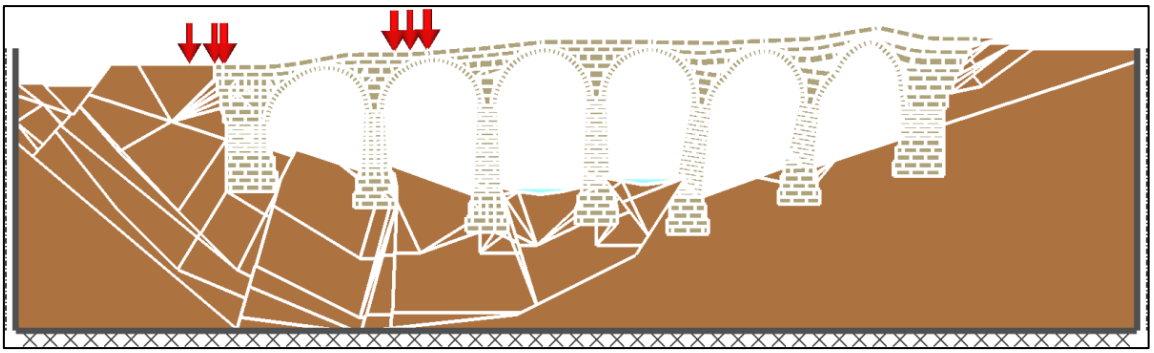
عندما تؤثر الأحمال الشاقولية على الجسر لا تتشكل مفاصل ضمن الأقواس (كما وجدنا سابقاً) وإنما يحدث الانهيار بهبوط الركيزة الطرفية.

أما عندما تؤثر الأحمال الأفقية يكون ميكانيزم الانهيار الحاصل بتشكل ثلاثة مفاصل في القوس الأخيرة (المفاصل 1-2-3) ومفصل في القوس الخامسة (المفصل 4) كما بالشكل (7-25). ويحدث تشوه في القوس الأولى.



الشكل (7-25) أماكن تشكل المفاصل عند حدوث ميكانيزم الانهيار تحت تأثير الأحمال الأفقية.

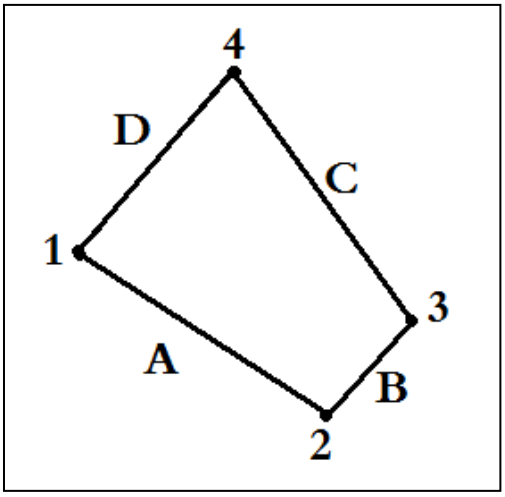
وعند وجود الأحمال الشاقولية والأفقية معاً يكون ميكانيزم الانهيار الحاصل مشابهاً للميكانيزم السابق كما بالشكل (7-26).



الشكل (7-26) ميكانيزم الانهيار تحت تأثير الأحمال الأفقية والشاقولية.

من أجل دراسة قيم القوى الداخلية سوف نختار النقاط التالية:

- من الفتحة الأولى النقطة (5).
- من الفتحة الثانية سوف نختار النقطة الواقعة تحت مركز الأحمال الشاقولية المطبقة.
- من الفتحة الخامسة نختار النقطة (4).
- من الفتحة السادسة نختار النقطة (2).



الشكل (7-27) عقد وأوجه العنصر

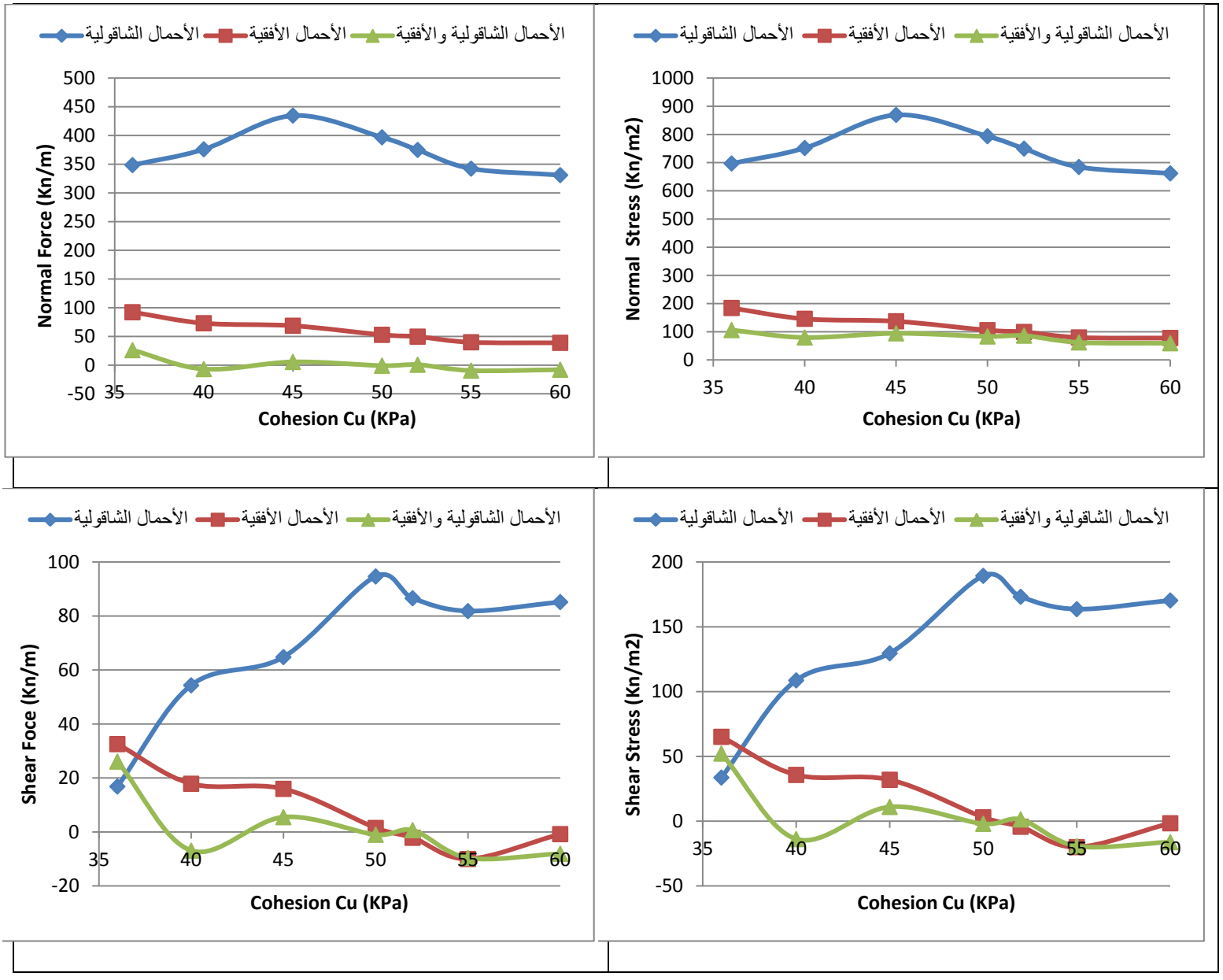
سوف ندرس قيم القوى الداخلية للنقاط السابق ذكرها كما من الشكل (17) على الوجه (C) للعنصر المدروس تحت تأثير كل من: الأحمال الشاقولية، الاحمال الافقية، الاحمال الافقية والشاقولية معاً. وذلك بالترافق مع حالات تدعيم التربة.

الجدول (7–12) قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الأولى.

Shear Force (kN/m)	Normal Force (kN/m)	Shear Stress (kN/m²)	Normal Stress (kN/m²)	Cohession Cu (Kpa)	
16.859	348.45	33.718	696.9	36	الأحمال الشاقولية
54.348	375.92	108.7	751.83	40	
64.798	434.67	129.6	869.34	45	
94.676	396.83	189.35	793.67	50	
86.607	374.82	173.21	749.65	52	
81.831	342.23	163.66	684.46	55	
85.191	330.91	170.38	661.82	60	
32.566	92.143	65.133	184.29	36	الأحمال الأفقية
17.872	72.941	35.743	145.88	40	
15.985	68.555	31.969	137.11	45	
1.496	52.753	2.9921	105.51	50	
-2.121	49.565	-4.242	99.13	52	
-10	39.824	-20	79.648	55	
-0.785	38.879	-1.571	77.758	60	
26.104	366.32	52.209	105.72	36	الأحمال الشاقولية والأفقية
-6.9	39.768	-13.8	79.537	40	
5.5057	47.12	11.011	94.24	45	
-1.007	41.622	-2.014	83.244	50	

0.6821	43.039	1.3642	86.078	52	
-9.595	31.038	-19.19	62.076	55	
-8.068	29.579	-16.14	59.158	60	

تبين المخططات التالية مقارنة بين تغير قيم وسلوك القوى الداخلية لنفس النقطة مع تغيـــر الأحمال الخارجية المؤثرة عليها.



الشكل (7-28) قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الأولى.

نلاحظ أن قيم القوى الداخلية تتناقص عند وجود تأثير الأحمال الأفقية والأحمـــال الأفقيـــة والشاقولية معاً عند زيادة قيمة معامل تماسك التربة. بينما تزداد هذه القيم عند وجود أحمال شاقولية فقط لتصل إلى الذروة من أجل (Cu=45 KPa) ثم تتناقص تدريجياً.
أما من أجل قوى القص فإنها تتناقص بشكل متذبذب مع زيادة معامل التماسك تحت تـــأثير الأحمال الأفقية والأحمال الأفقية والشاقولية بينما تتزايد من أجل وجود أحمال شاقولية.

الجدول (7-13) قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الثانية.

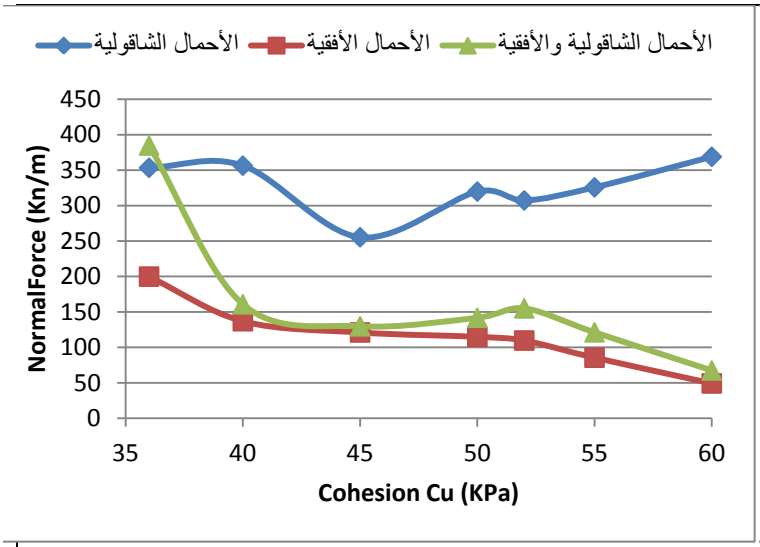
Shear Force (kN/m)	Normal Force (kN/m)	Shear Stress (kN/m²)	Normal Stress (kN/m²)	Cohession Cu (Kpa)	
43.425	353.39	86.85	706.78	36	الأحمال الشاقولية
0.8703	356.33	1.7406	712.66	40	
51.579	255.35	103.16	510.69	45	
3.2596	319.8	6.5192	639.61	50	
0.5846	307.27	1.1692	614.53	52	
-0.435	325.73	-0.87	651.46	55	
-2.137	368.88	-4.273	737.75	60	
20.706	199.83	41.413	399.65	36	الأحمال الأفقية
12.566	136.94	25.132	273.89	40	
14.29	121	28.58	241.99	45	
17.368	114.89	34.736	229.77	50	
25.113	109.64	50.226	219.28	52	
19.346	85.432	38.692	170.86	55	
6.8669	49.104	13.734	98.208	60	

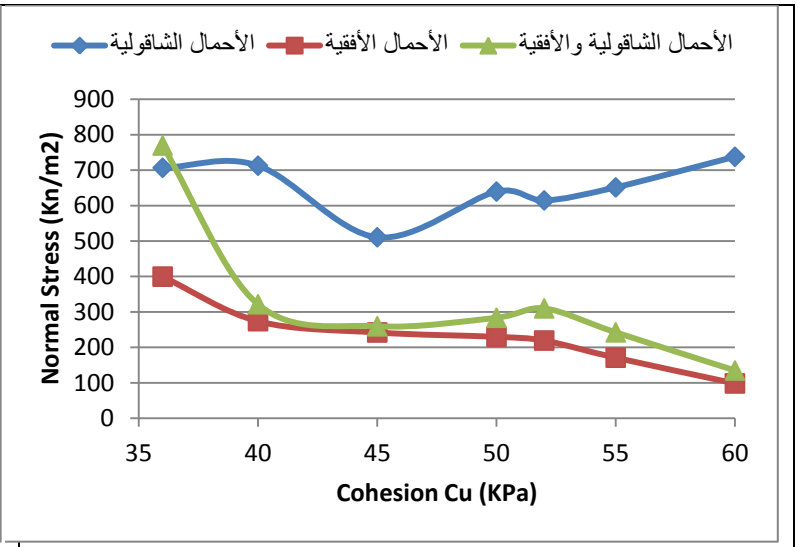
الأحمال الشاقولية والأفقية	36	769.63	55.916	384.82	27.958
	40	321.66	-20.25	160.83	-10.12
	45	259.5	0.4505	129.75	0.2253
	50	283.52	2.5889	141.76	1.2944
	52	310.02	2.5728	155.01	1.2864
	55	242.38	-1.04	121.19	-0.52
	60	134.64	1.4922	67.322	0.7461

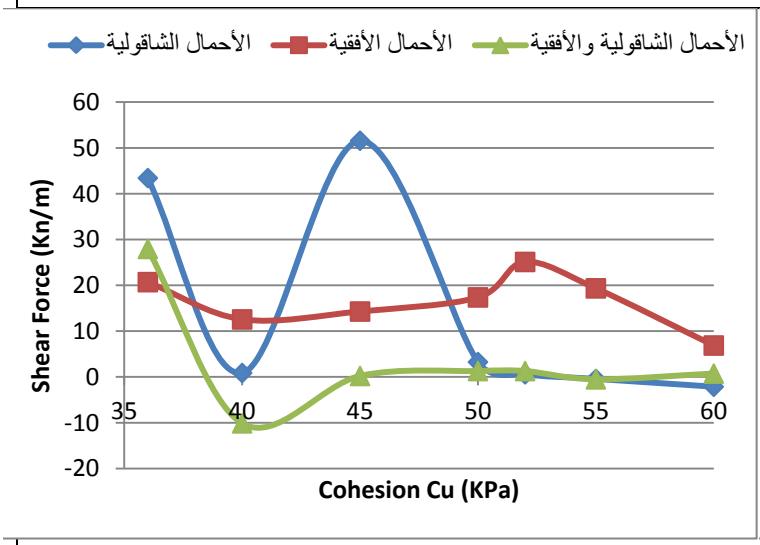
تبين المخططات التالية مقارنة بين تغير قيم وسلوك القوى الداخلية لنفس النقطة مع تغير الأحمال الخارجية المؤثرة عليها.

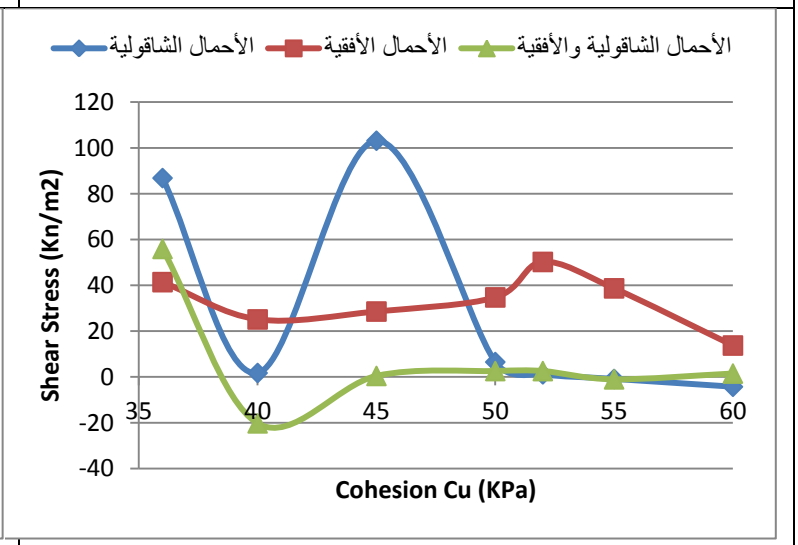
نلاحظ أن قيمة القوى الداخلية تحت تأثير الأحمال الشاقولية يتناقص مع زيادة تماسك التربة ثم يتزايد ليبلغ قيمة تساوي تقريباً قيمة مقابلة لحالة عدم التدعيم. أما من أجل تأثير الأحمال الأفقية والأفقية والشاقولية معاً فإن قيم القوى الداخلية تتناقص مع زيادة شدة التدعيم.

من أجل قوى القص الداخلية فإنها تتناقص بشكل عام من أجل زيادة شدة التدعيم، ولكن وجود الأحمال الخارجية الشاقولية يسبب تغير الشكل العام للمنحني حيث تزداد القيمة لتبلغ الذروة من أجل (Cu=45 KPa) ثم يتناقص. نلاحظ أن هذا التغير قد تكرر من أجل هذه الحالة والحالة السابقة.









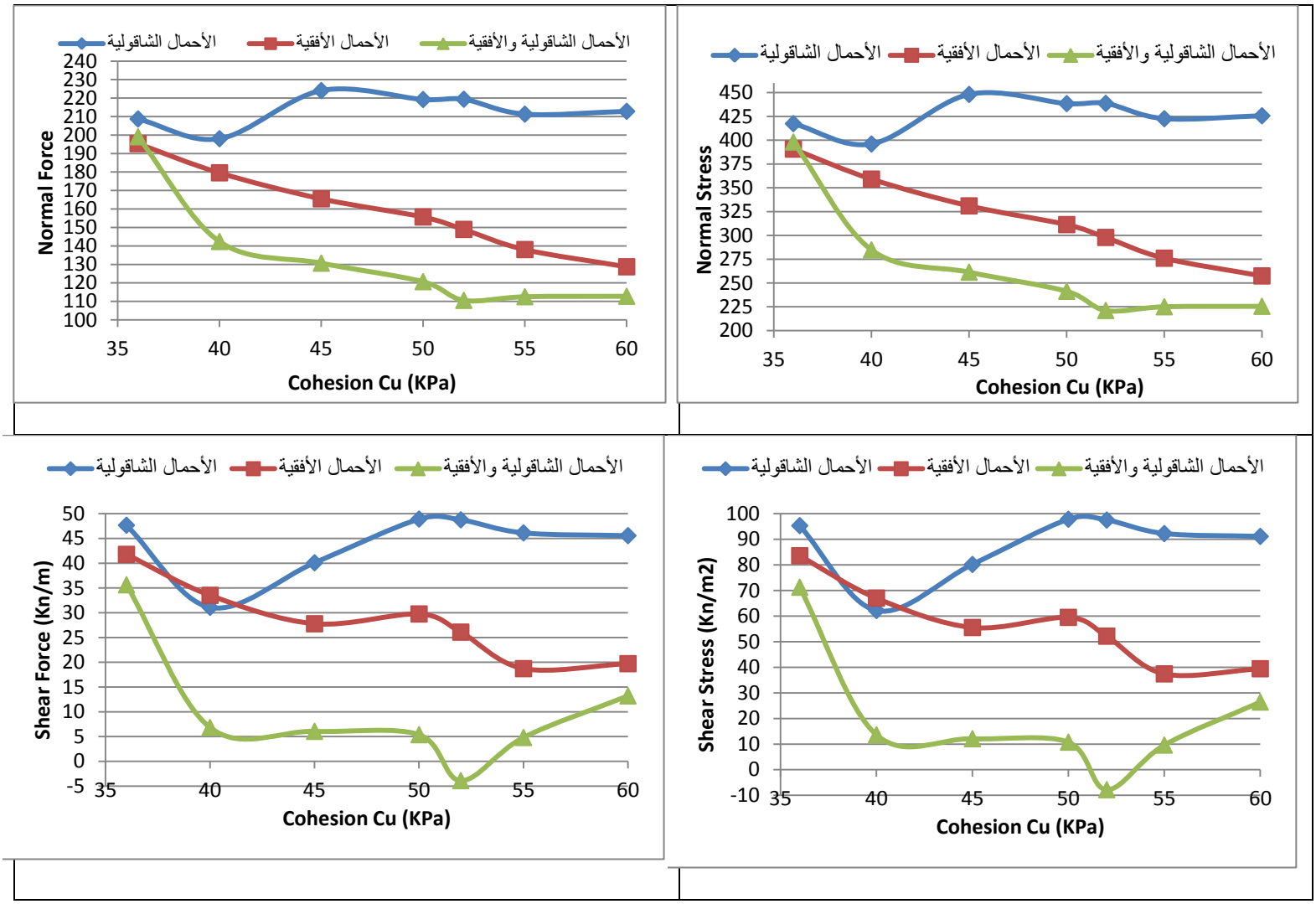
الشكل (7–29) قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الثانية.

الجدول (7–14) قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الخامسة.

Shear Force (kN/m)	Normal Force (kN/m)	Shear Stress (kN/m²)	Normal Stress (kN/m²)	Cohession Cu (Kpa)	
47.667	208.7	95.328	417.39	36	الأحمال الشاقولية
31.093	198.02	62.182	396.01	40	
40.09	224.05	80.177	448.07	45	
48.919	219.22	97.834	438.42	50	

	52	438.69	97.522	219.36	48.763
	55	422.58	92.243	211.3	46.124
	60	425.64	91.122	212.83	45.563
الأحمال الأفقية	36	390.64	83.569	195.33	41.787
	40	359.12	67.025	179.57	33.514
	45	330.99	55.545	165.5	27.774
	50	311.33	59.501	155.67	29.752
	52	297.85	52.168	148.93	26.085
	55	276.04	37.428	138.03	18.715
	60	257.42	39.433	128.72	19.717
الأحمال الشاقولية والأفقية	36	398.11	71.287	199.07	35.645
	40	284.79	13.639	142.4	6.8199
	45	261.36	12.095	130.69	6.0477
	50	241.31	10.756	120.66	5.3781
	52	221.12	-7.809	110.56	-3.905
	55	225.05	9.6246	112.53	4.8125
	60	225.52	26.428	112.77	13.215

تبين المخططات التالية مقارنة بين تغير قيم وسلوك القوى الداخلية لنفس النقطة مع تغيــر الأحمال الخارجية المؤثرة عليها.



الشكل (7-30) قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة الخامسة.

نلاحظ أن قيم كل من قوى القص والقوى الداخلية تتناقص مع زيادة معامل التماسك تحت تأثير الأحمال الأفقية.

يسبب تدعيم التربة بالتزامن مع وجود الأحمال الأفقية والشاقولية معاً تناقص قيم القوى الداخلية. أما قوى القص فإنها تتناقص إلى أقل قيمة لها والتي تقابل قيمة التدعيم المثلى من أجل (Cu=52 KPa) ثم تعود لتتزايد.

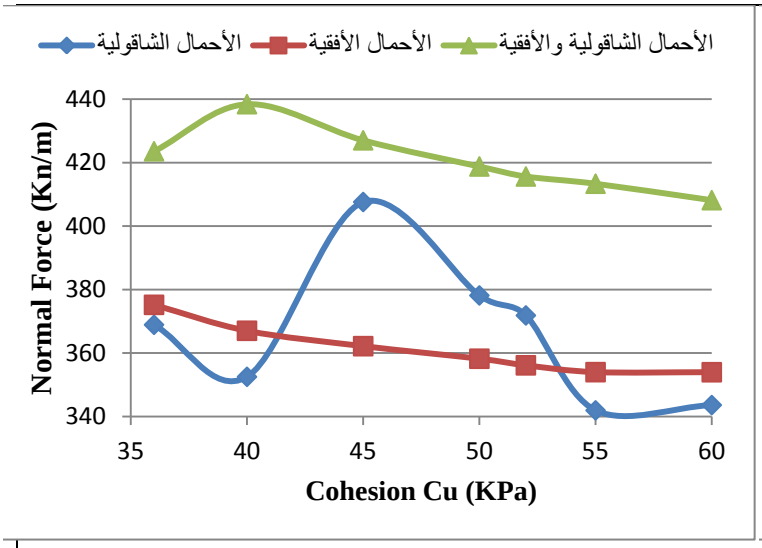
ومن أجل وجود تأثير الأحمال الشاقولية فقط فإن قيم كل من القوى الداخلية وقوى القص يتناقص قليلاً ثم يتزايد.

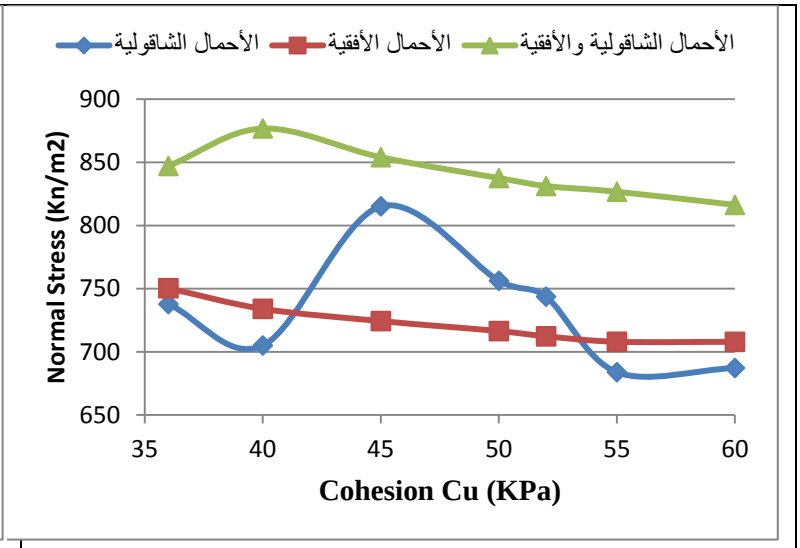
الجدول (7–15) قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة السادسة.

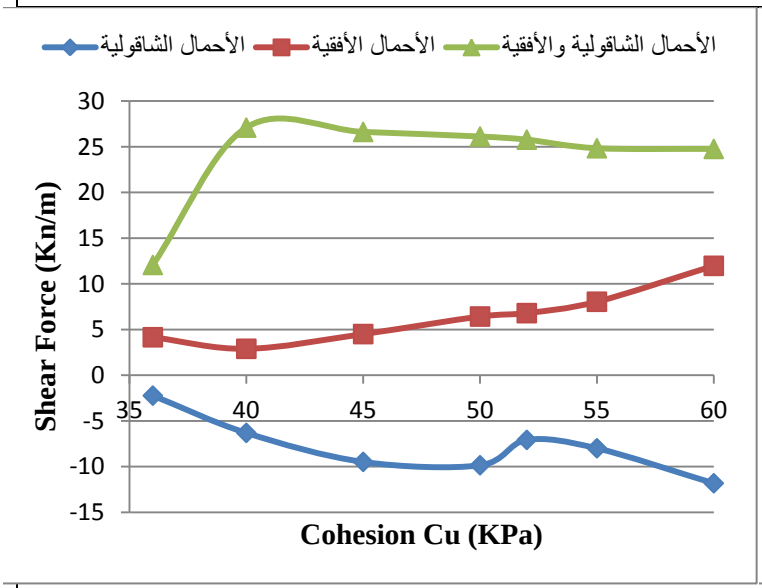
Shear Force (kN/m)	Normal Force (kN/m)	Shear Stress (kN/m²)	Normal Stress (kN/m²)	Cohession Cu (Kpa)	
-2.229	368.9	-4.459	737.78	36	الأحمال الشاقولية
-6.305	352.51	-12.61	705	40	
-9.479	407.6	-18.96	815.18	45	
-9.848	378.15	-19.7	756.28	50	
-7.074	371.85	-14.15	743.68	52	
-7.991	341.93	-15.98	683.85	55	
-11.82	343.6	-23.63	687.19	60	
4.1572	375.19	8.3141	750.35	36	الأحمال الأفقية
2.894	367.02	5.7879	734.02	40	
4.5039	362.17	9.0075	724.32	45	
6.4239	358.21	12.847	716.4	50	
6.7954	356.13	13.59	712.25	52	
8.0423	353.98	16.084	707.94	55	
11.97	353.95	23.939	707.87	60	
12.068	423.58	24.136	847.13	36	الأحمال الشاقولية والأفقية
27.096	438.43	54.191	876.84	40	
26.625	427.05	53.249	854.08	45	
26.119	418.8	52.237	837.58	50	

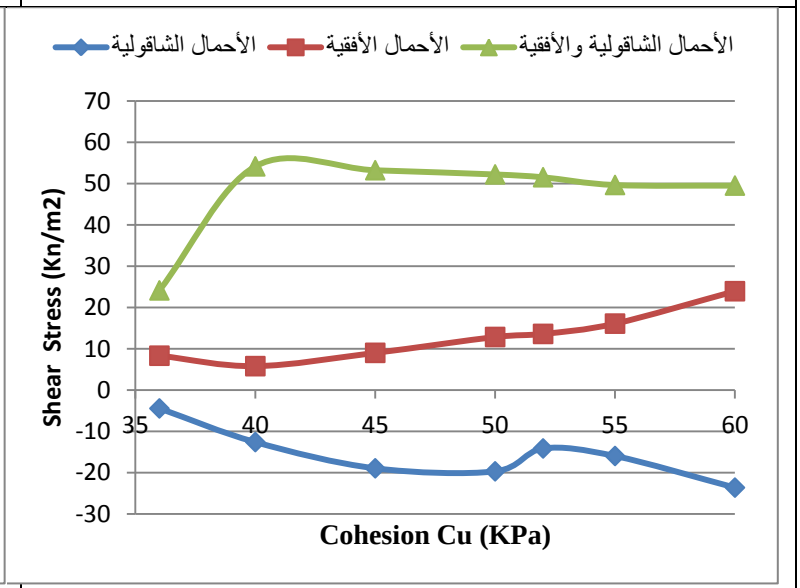
25.777	415.65	51.552	831.27	52	
24.839	413.37	49.676	826.71	55	
24.764	408.18	49.527	816.33	60	

تبين المخططات التالية مقارنة بين تغير قيم وسلوك القوى الداخلية لنفس النقطة مع تغيـــر الأحمال الخارجية المؤثرة عليها.









الشكل (7-31) قيم القوى الداخلية المتشكلة في الفتحة السادسة.

نلاحظ أن قيم القوى الداخلية تحت تأثير الأحمال الأفقية والشاقولية معاً كانت أكبر من قيمها تحت تأثير الأحمال الأفقية (على خلاف الحالات السابقة).

من أجل القوى الداخلية: تتناقص قيمتها تحت تأثير الأحمال الأفقية والأحمال الأفقية والشاقولية معاً. بينما تتزايد لتصل إلى الذروة من أجل (Cu=45 KPa) (كم من أجل الحالتين الأولى والثانية أعلاه) ثم تتناقص.

من أجل قوى القص: تتزايد تحت تأثير الأحمال الأفقية والأحمال الأفقية والشاقولية معاً بينما تتناقص تحت تأثير الأحمال الشاقولية.

نلاحظ من المخططات السابقة أن التدعيم باستخدام طريقة حقن التربة أثر بشكل إيجابي على قيم القوى الداخلية لمعظم الحالات وبشكل سلبي على الجزء الآخر. لكن هذه الطريقة بشكل عام أدت إلى تحسين السلوك العام للجسر وزادت من قدرته على تحمل الأحمال الخارجية على اختلافها وجعلت الجسر في مجال الأمان.

كما نلاحظ من المخططات أن تأثير الأحمال الخارجية على قيم القوى الداخلية يتغير دون وجود قاعدة تحكم هذا التغيير، قد تنخفض قيم القوى الداخلية أو ترتفع دون وجود قاعدة لهذا الاختلاف. يعود السبب لعدة عوامل أهمها أن ميكانيزم الانهيار يتغير كلما تغير الحمل الخارجي وعلى هذا الأساس سوف تتغير كافة قيم القوى الداخلية المتشكلة في النقاط المدروسة بسبب تغير مناطق تشكل المفاصل. كما أن مكونات الجسر الحجري عبارة عن عناصر حجرية مستقلة عن بعضها البعض بسلوكها وتترابط فيما بينها بالمواد الرابطة لذلك لا يسلك القوس سلوك عنصر واحد كما في المنشآت البيتونية أو الفولاذية ولا يمكن معاملته كعنصر واحد.

كما أن تغيير طريقة التدعيم والقيم المتعلقة بها يؤثر بنفس الطريقة على قيم القوى الداخلية.

الفصل الثامن: النتائج والتوصيات

8-1- النتائج:

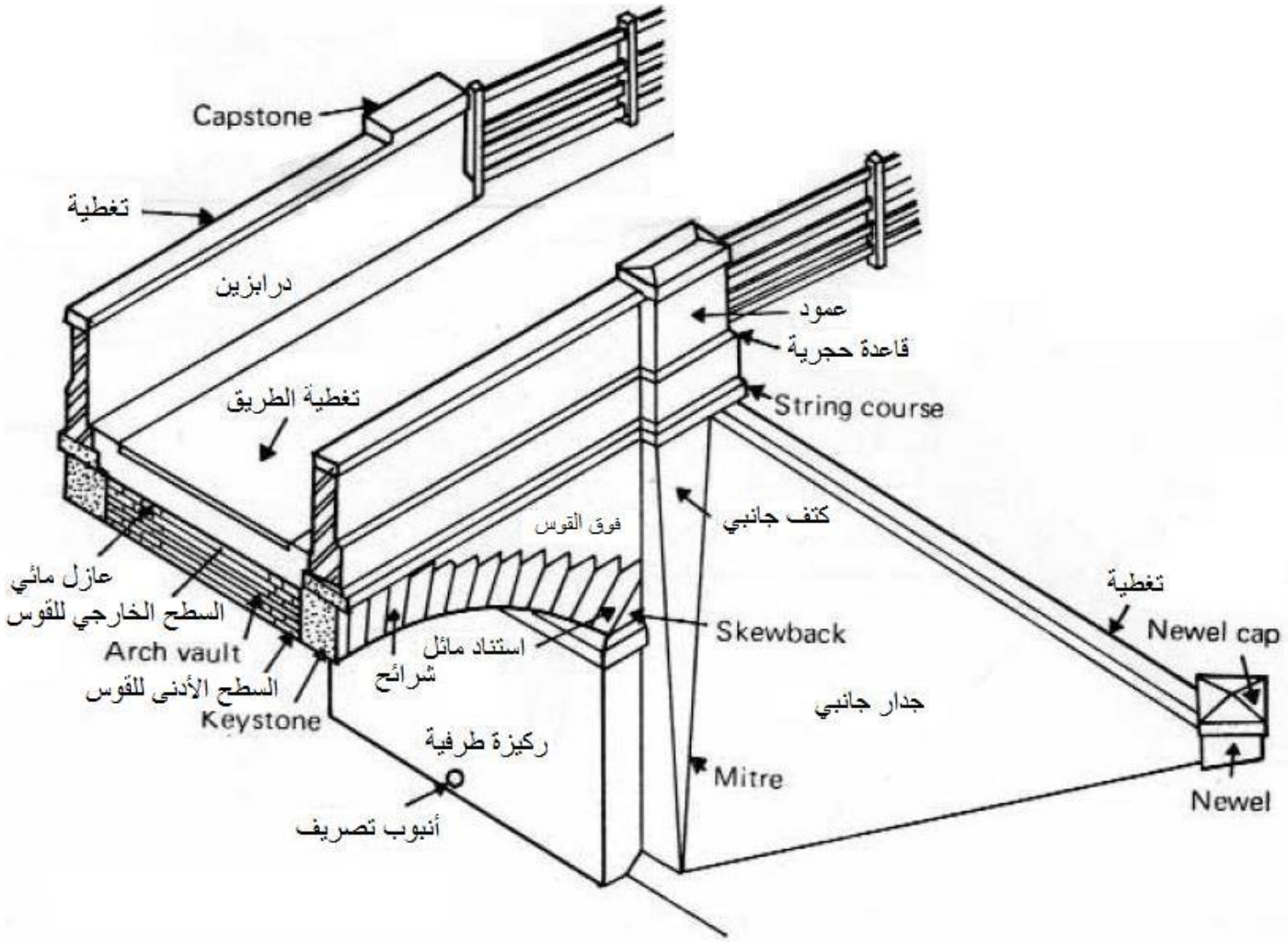
تم في هذا البحث دراسة جسر حجري لسكة حديد مكون من ستة فتحات، تمت النمذجة باستخدام برنامج (GEO3.2) وهو يعتمد التحليل اللاخطي. وقد تمت دراسة تأثير حركة القطار التصميمي على الجسر (ممثلاً بالقوى الشاقولية) وتأثير الزلزال التصميمي على الجسر (ممثلاً بالقوى الأفقية) لتحديد قدرة تحمل الجسر على الأحمال التصميمية ومعرفة حاجته للتدعيم، حيث كانت النتيجة أن الجسر ينهار بسبب ضعف تربة التأسيس (كما يوضح ميكانيزم الانهيار) لذلك كان الحل باستخدام طريقة حقن التربة بهدف زيادة تماسكها ورفع قدرتها على مقاومة الأحمال التصميمية مما يجعل الجسر بحالة الأمان.

8-2- التوصيات:

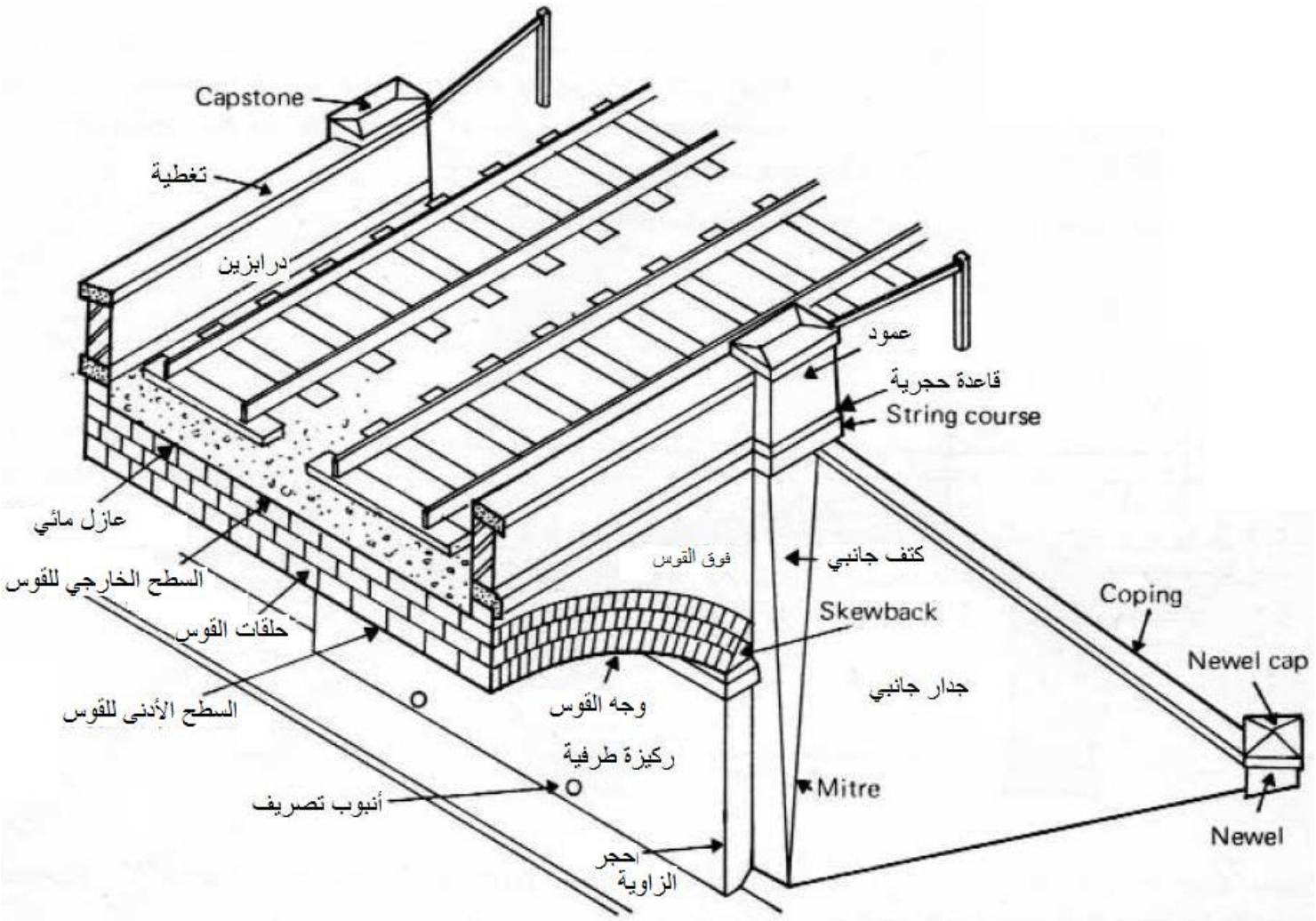
يوصى في الأبحاث القادمة بدراسة قيم القوى الداخلية لعدة نقاط ضمن فتحة واحدة وتحت تأثير نوع واحد من الأحمال لبيان كيفية تغيرها مع تغير تدعيم التربة.

كما يوصى بدراسة قيم الهبوطات الحاصلة للأساسات وقيم الإجهادات المتشكلة في التربة.

الملحق /1/: تعاريف العناصر الخاصة بالجسر الحجري



الشكل (1) رسم توضيحي للعناصر الأساسية في الجسر الحجري القوسي



الشكل (2) رسم توضيحي للعناصر الأساسية في الجسر الحجري لسكة حديدية

الركيـــزة الطرفيـــة Abutment	جسم، عادة من الحجر، يؤمن المقاومة ضد القوى الشاقولية ودفع القوس.
الطين–الطوب Adobe	مادة مُشَكَّل بإنتظامة يصنع من الطين الجاف، ويدمج معه القــش عادة لإعطائه التماسك.
القوس Arch	عنصر إنشائي منحني يتحمل الأحمال الشاقولية فوق الفتحة وينقلها إلى الركائز الطرفية والوسطية.
جسم القوس Arch barrel	يتحمل جزء من أحمال القوس. مكون من شرائح موحدة الســماكة أو عدة حلقات من الآجر أو تعاقب أنقاض عشوائية.
الحجر المربع المنحوت Ashlar	نوع من الحجر يُشَكَّل على شكل كتل حجريــة منتظمــة مربعــة الشكل.
نسبة الشكل Aspect ratio	تمثِّل نسبة طول المجاز (المحور الطولي للجسر) إلــى عرضــه (محوره العرضي).
التقييم Assessment	يُستخدَم هنا بشكل محدد للدلالة على تقييم أداء الجســر وقدرتــه الإنشائية، ويكون عادةً بإحدى الطرائــق الموصــوفة و الممكــن استخدامها في تطبيقات النظام.
مواد الملء/الردم Backfill or (backing/fill/infill)	مادة (عادة نوعية ملء منخفضة) تستخدم لإعطاء الــدعم خلــف المنشأ. للجسور الحجرية القوسية، تتوضع المــواد المالئــة فــوق القوس بين جسم القوس وسطح الطريق وتُحجَز جانبياً بالجــدران فوق القوس أو/و جدران الأجنحة. يحوي عادةً مواد حبيبية مثــل الحصى أو ركام البناء.
الأساس الملاطي Bedding mortar	وهو الملاط بين الوحدات الحجرية الذي يشكل جزء مــن المنشــأ الحجري، ويتميز مثل الملاط الموضعي، المســتخدم للإنهــاءات الخارجية للعقد؛ في المنشأ الأصلي، والتي تكون متماثلة عادةً.
Bed joint	عقدة بين السلاسل الحجرية.

التربيط Bond	ترتيب وحدات الحجر بشكل لا يسمح للعقد الشاقولية لسلسلة واحدة أن تتطابق مع الأحجار الأغلى أو الأدنى منها.
التَمَركُز Centering	منشأ مؤقت يَدْعم القوس خلال عملية البناء، يُصنع عادةً من الخشب.
الصيانة Conservation	عمل يُنَفَّذ بهدف المحافظة أو إعادة الميزات الهامة للجسر، وخاصة الأجزاء المرئية من المنشأ.
السطح الخارجي Extrados	هو السطح العلوي في قوسٍ أَو قبة، مثال في جسم القوس هو المنحني الخارجي (المحدَّب) للقوس.
آجر الواجهة Facing brick	آجر ذو لون ومتانة مناسبة للاستخدام على سطوح العناصر الحجرية المكشوفة.
التعب Fatigue	تخفيض حمل التعب بتطبيق الأحمال المتكررة.
الجسر التاريخي Historic bridge	يكون ذو قيمة تاريخية، إما من ناحية الندرة، من الناحية الاجتماعية، الثقافية أو الإرث الهندسي.
المعاينة Inspection	وهي فحص بصري للجسر والمنشآت المترابطة، وقد تكون مزودة بطرائق بسيطة أخرى للتقييم أو القياس.
السطح/الوجه الداخلي Intrados	هو السطح أو الوجه الداخلي في قوسٍ أَو قبة، مثال في جسم القوس هو المنحني الداخلي (المقعَّر) للقوس.
التحقيق Investigation	وهو التحقيق حول واحد أو أكثر من سمات الجسر الإنشائية، بيئته، أداؤه أو سلوكه، يَستخدم عادةً تقنيات أو قياسات، اختبارات.
حجر الأساس Keystone	الحجر الأعلى والأخير الذي يوضع في القوس. في جسم قوس الجسر توجد سلسلة من الأحجار الرئيسية عند التاج، على كامل عرضه، والتي تبدو واضحة غالباً على الواجهات الجانبية.
الارتشاح Leaching	عملية تدهور حيث تسبب الرطوبة الموجودة داخل سطح المادة أو خارجه إزالة المكونات القابلة للذوبان.

الملاط الكلسي Lime mortar	يتم انتاج الملاط الكلسي من مزيج الكلس المشبع، الرمل والماء والتي ترتبط على الأقل جزئياً بشكل تدريجي بتفاعلات مع أكسيد الكربون الجوي ("عملية الكربنة") لتقوية وتطوير الصلابة. يُنتِج الكلس الصافي (والمعروف أيضاً بالدهني أو غير الهيدروليكي) ملاط أضعف وأكثر ثقوباً ونفوذيةً من الملاط الهيدروليكي (يعتمد على الماء) أو تلك الممزوجة بالإسمنت البورتلندي.
الصيانة Maintenance	تحتاج جميع العمليات إلى صيانة في مرحلة الخدمة حتى نهاية العمر التصميمي، تشمل الصيانة الدورية (عمل دوري يُنفَّذ بهدف منع التدهور أو السيطرة عليه، يتضمن المعاينة والمراقبة) والصيانة الضرورية (أعمال إعادة التأهيل المطلوبة لمعالجة بعض النقص في الأداء والوظيفة، مثل التقوية).
الحجر Masonry	عمل البنّاء، وعلى الرغم من دقة العمل بالحجر، إلا أنها تستخدم غالباً للحالة العامة للعمل في المباني الآجرية أو الحجرية، كما هي الحالة هنا.
الحجر الإسمنتي Masonry cement	مزيج من الإسمنت البورتلندي (تضم عادةً 75%) والباقي يكون مواد ملء، تستخدَم عادةً للتطبيقات العامة.
الملاط Mortar	مزيج مكون من رابطة أو عدة روابط لا عضوية، تجمعات، ماء وأحياناً إضافات و/أو مزيج أساسي.
القوس متعدد الحلقات Multi-ring arch	**قوس** له أكثر من حلقة واحدة. يمكن أن تنفصل الحلقات بالكامل بواسطة مفاصل الملاط، أو يمكن أن تتصل إنشائياً بكتل الحجر الموضوعة رأسياً بين الحلقات.
الدرابزين Parapet	يكون عادة استمرار شاقولي للجدار فوق القوس؛ وهو امتاد علوي للجدار فوق القوس يتجاوز منسوب الطريق لحماية من على الطريق وتحت الجسر.

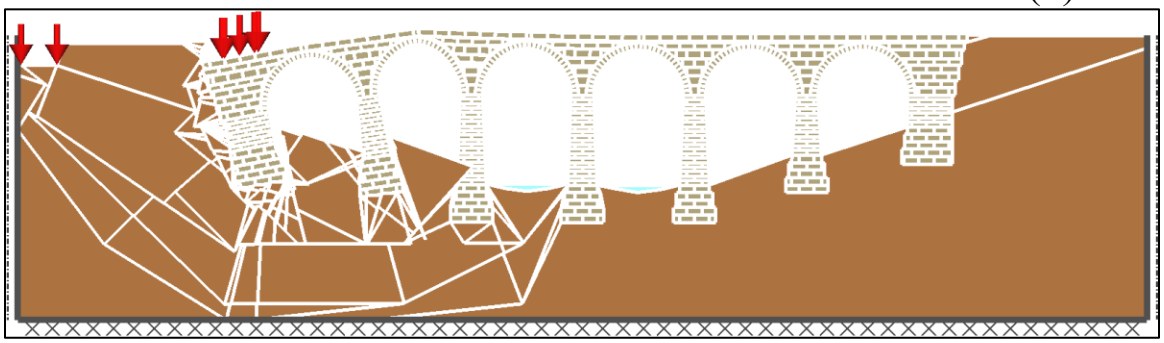
الأداء Performance	عملية و/أَو وظيفة الجسر أَو عنصر الجسر، تتعلق بمتطلبات المالكين /الشاغلين /المستخدمين.
الركيزة الوسطية Pier	لَها تعريفان: (a) دعم وسطي بين قناطرِ الجسرِ المتجاورة، أَو (b) مقطع عريض متوضع على مسافات ممتدة على طول الجدار الحجري لتقويته.
إعادة التأهيل Rehabilitation	عمل يتضمن إضافة ميزات لجسر متدهور لإعادته إلى حالة وظيفية مُرضية.
الحلقة Ring	طبقة من العناصر الحجرية العرضية المفردة والتي تشكل وحدات رفيعة تصنع بمجملها جسم القوس. في أعمال الآجر، تُستخدم غالباً حلقات متعددة متجاورة لتشكيل قوس متعدد الحلقات.
انفصال الحلقة Ring separation	فقدان الترابط بين الحلقات المتجاورة (ليس بالضرورة تشكيل فجوة) في القوس متعدد الحلقات.
ارتفاع القوس Rise	الارتفاع الشاقولي للقوس اعتباراً من منسوب الاستناد حتى الوجه الداخلي للتاج.
الحت Scour	إزالة المادة حول مساند المنشأ بفعل تدفق الماء.
القوس القطعي Segmental arch	قوس يتكون سطحه الداخلي من قطع دائري أصغر يكون من نصف دائرة.
القوس نصف الدائري Semicircular arch	قوس يكون شكل سطحه الداخلي نصف دائري (مثال قوس زاويته 180°) وبالتالي يبلغ ارتفاع القوس نصف طول المجاز.
الوجه الداخلي للقوس Soffit	الجنب السفلي لعنصر–في الجسور الحجرية القوسية، تكافئ السطح الداخلي (intrados).
المجاز Span	المسافة بين نقاط استناد القوس المنفرد على امتداد المحور الطولي.
الجزء فوق القوس Spandrel	المنطقة المحصورة بين جسم القوس وسطح الطريق (أو مكافئ)،

	مُحاط بالجدران الموجودة فوق القوس، مواد ملء أو فراغ، وأحياناً عناصر مخفية مثل الجدران الداخلية فوق القوس.
الجدران فوق القوس Spandrel wall	جدار حجري يتوضع على طرف جسم القوس ويوضح حدود وكمية محتوى مواد الملء. أحياناً قد تتواجد جدران داخلية أعلى القوس في مواقع أخرى على القوس.
انفصال الجدران فوق القوس Spandrel separation	يُعبِّر عن الانفصال الجانبي، وفيه يتحرك الجدار فوق القوس أفقياً بسبب تأثير الأحمال المطبقة، أحياناً على السطح الخارجي للقوس وأحياناً عن طريق تشكُّل تشققات في جسم القوس بالقرب من الوجه الخارجي. ويمكن أن يكون أيضاً انفصال مماسي، وفيه يتشكل تشقق مماسي للقوس عند الاتصال بين القوس والجدران فوقه.
الاستناد Springing	المستوي الذي فيه تتصل مساند القوس بين الوجه الشاقولي للركيزة الطرفية وجسم القوس.
الواحدة Unit	قطعة حجر أو آجر موضوعة بشكل مستقل، ويستخدم الملاط عادة لتشكيل البناء.
الشريحة Voussoir	قطعة حجر ذات شكل وتدي تُستخدم لتشكيل قوس أو قنطرة (يمكن أن تكون الشرائح مسطحة أو غير منتظمة عند البناء).
العرض Width	البعد العرضي للجسر، وهو عمودي على مجاز الجسر.
جدار الجناح Wing wall	جدار عند الركيزة الطرفية للجسر، يمتد إلى خلف الجسر لحجز التربة الموجودة وراء الركيزة الطرفية.

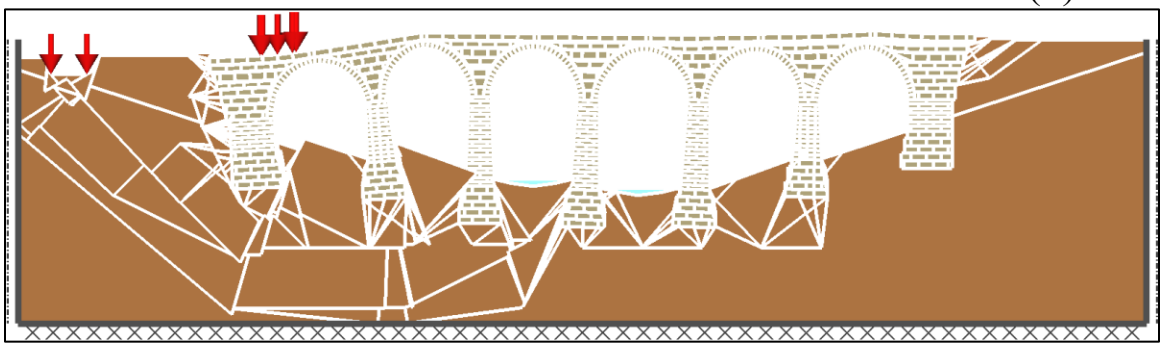
الملحق /2/: أشكال الانهيار المرافقة للجدول (7-3)

أشكال الانهيار المرافقة للحالات الموجودة في الجدول (7-3) والتي هدفها تحديد الحالة الأخطر لمكان وجود العربة على الجسر.

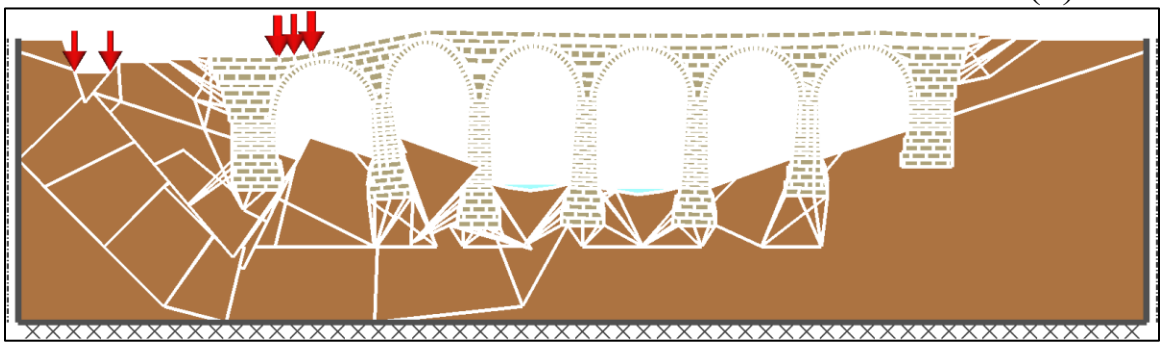
الحالة (1)



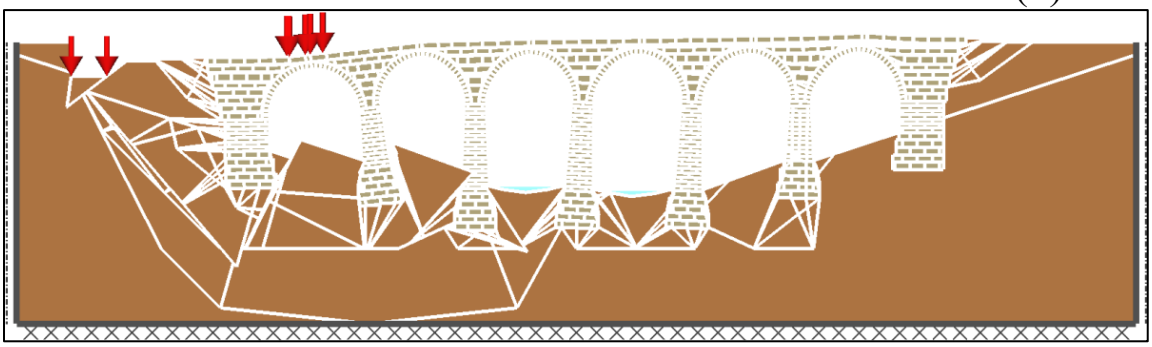
الحالة (2)



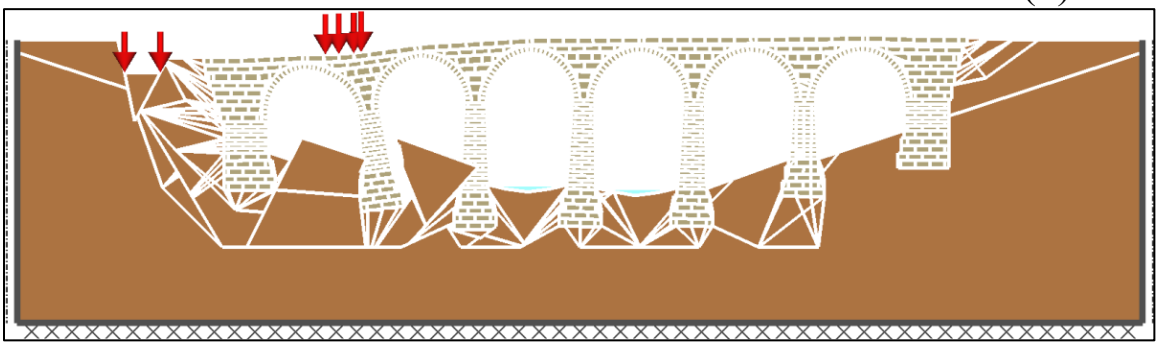
الحالة (3)



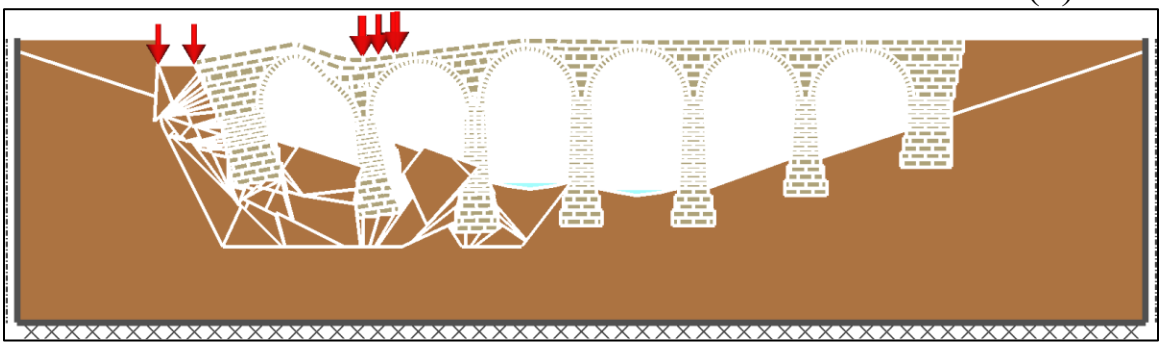
الحالة (4)



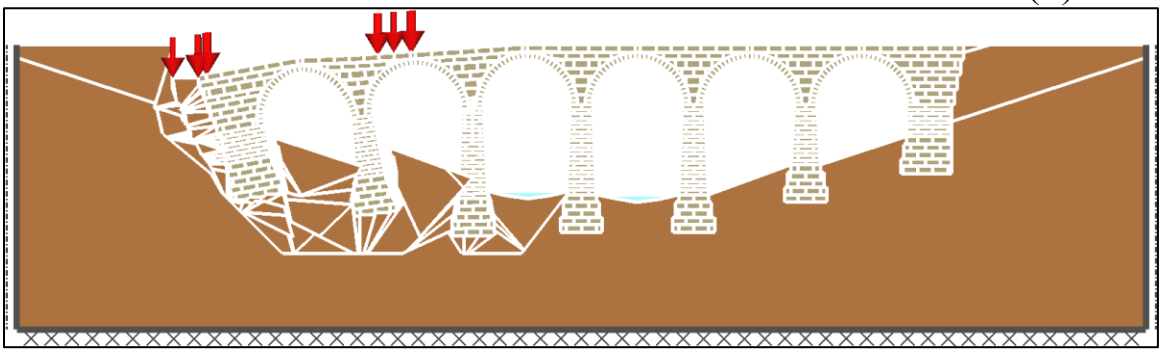
الحالة (5)



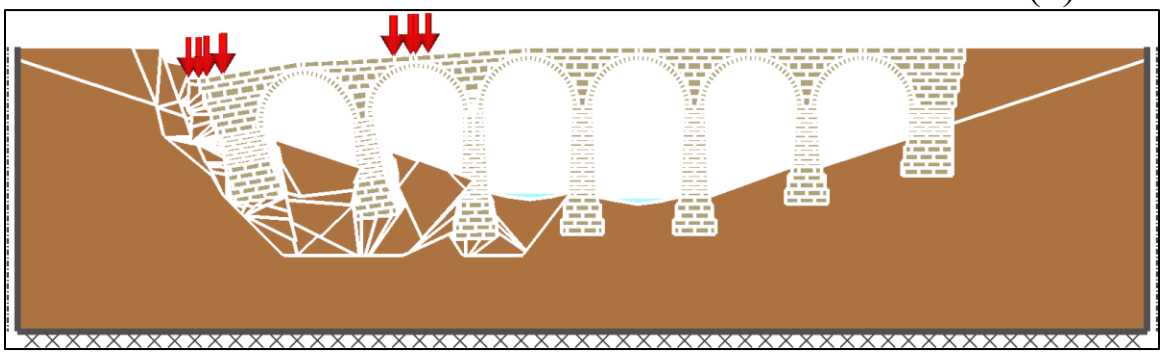
الحالة (6)



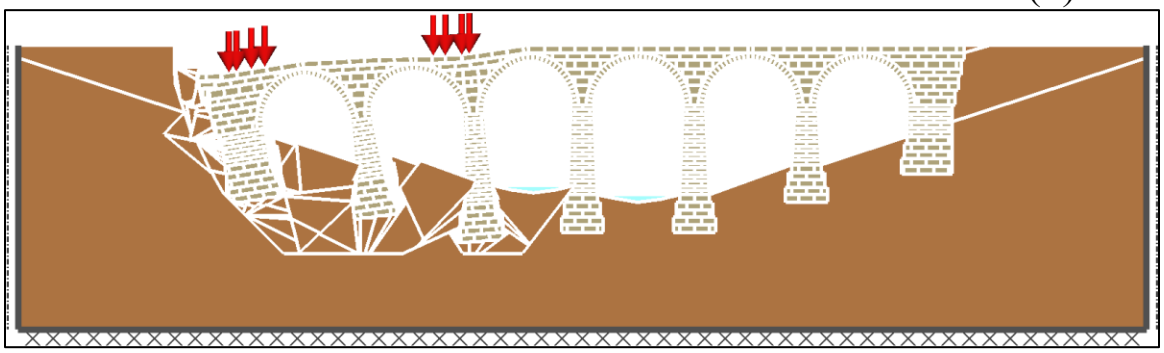
الحالة (7)



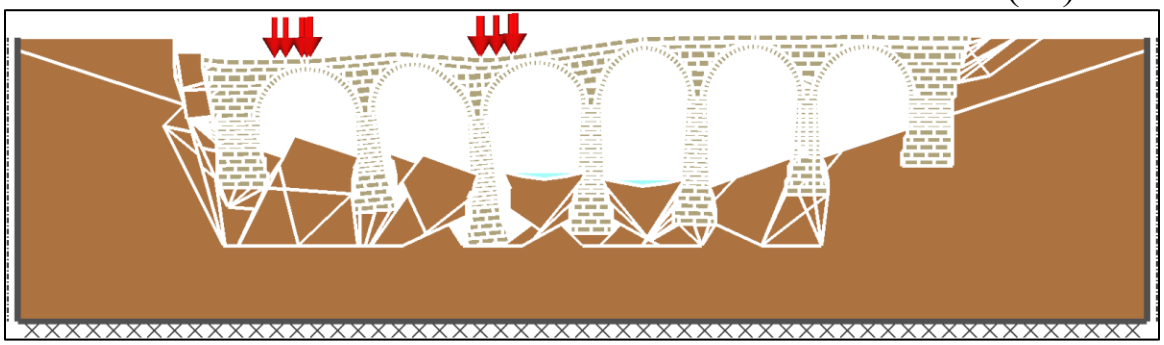
الحالة (8)



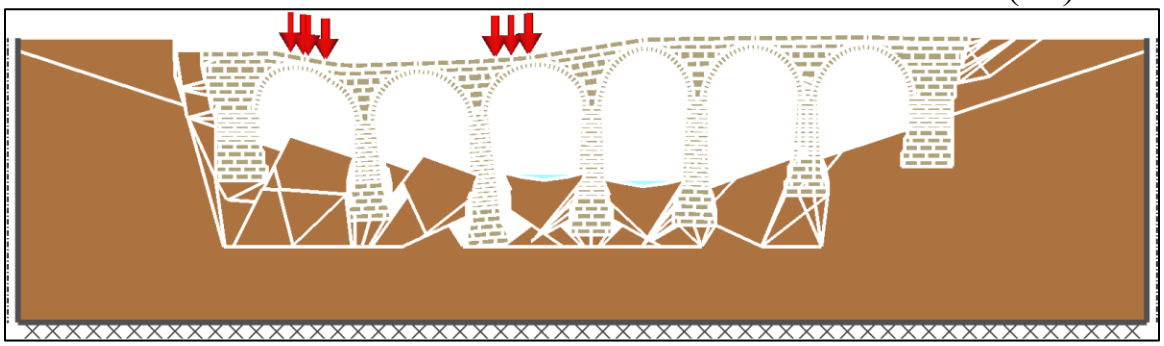
الحالة (9)



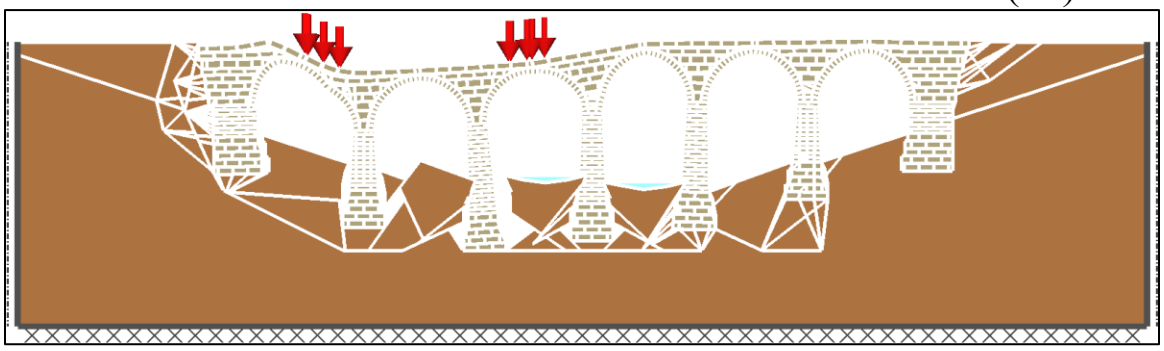
الحالة (10)



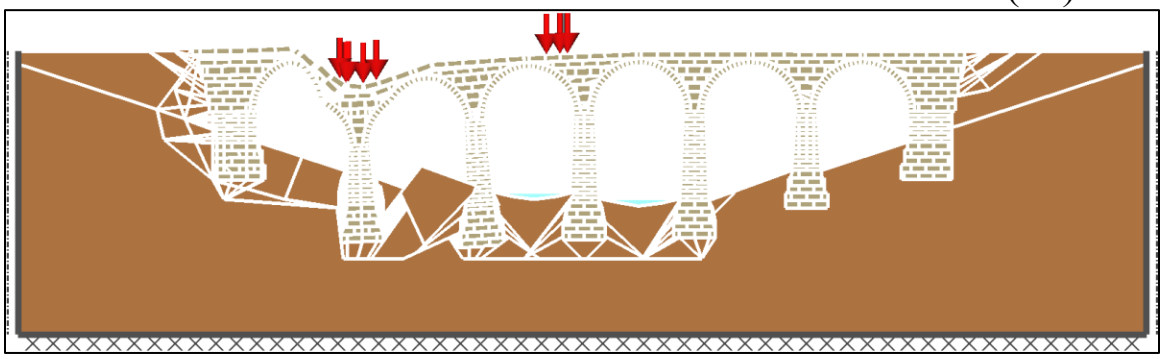
الحالة (11)



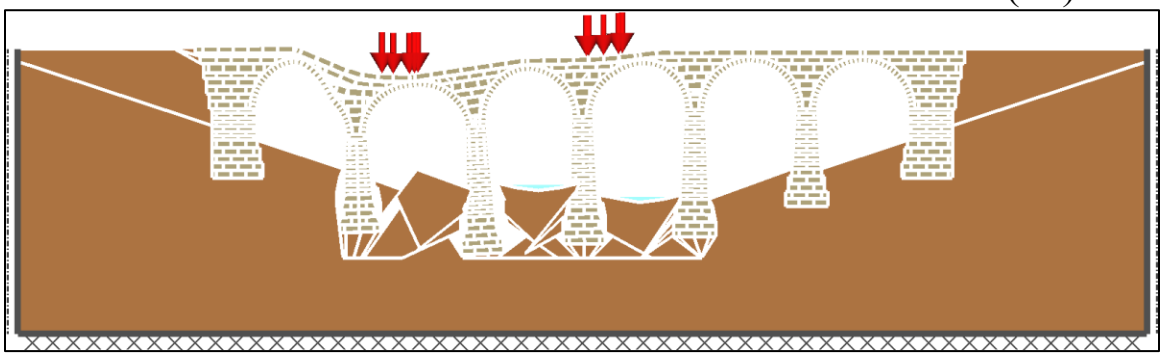
الحالة (12)



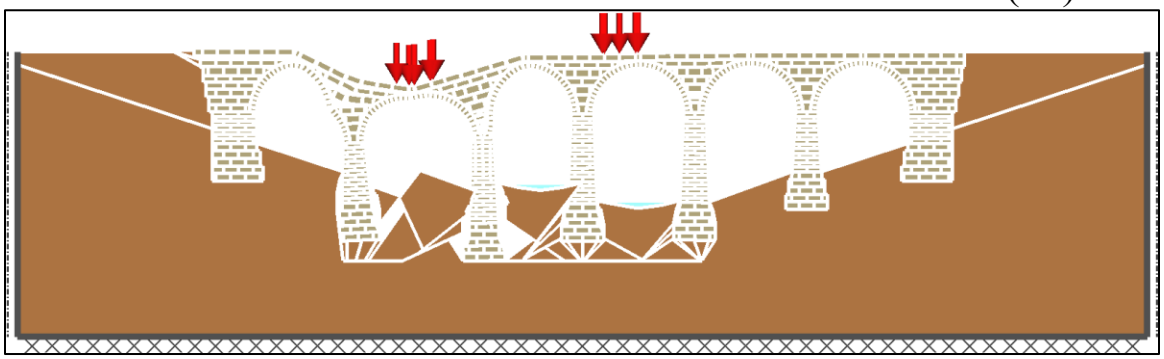
الحالة (13)



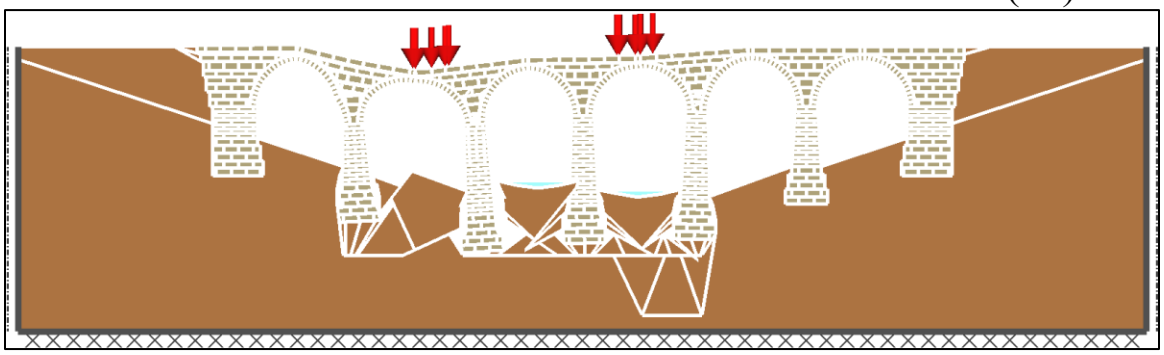
الحالة (14)



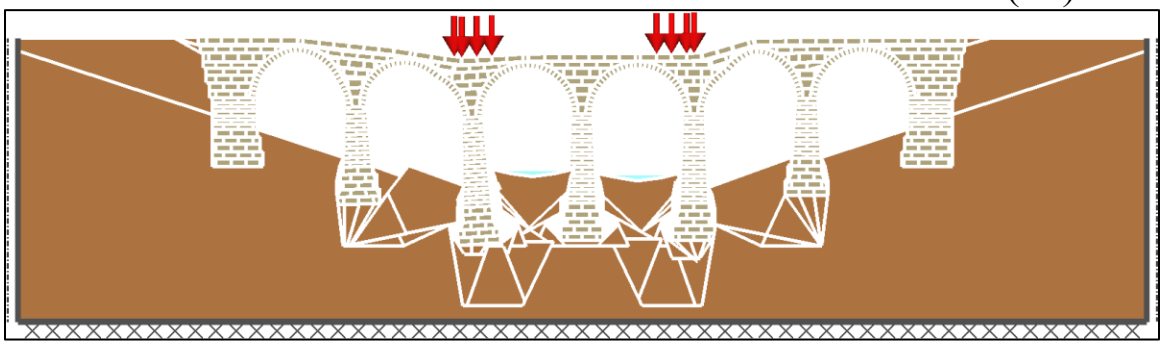
الحالة (15)



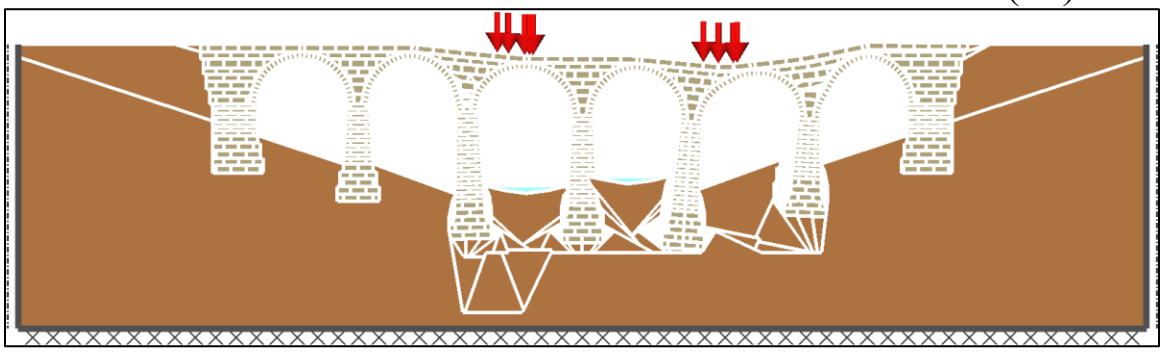
الحالة (16)



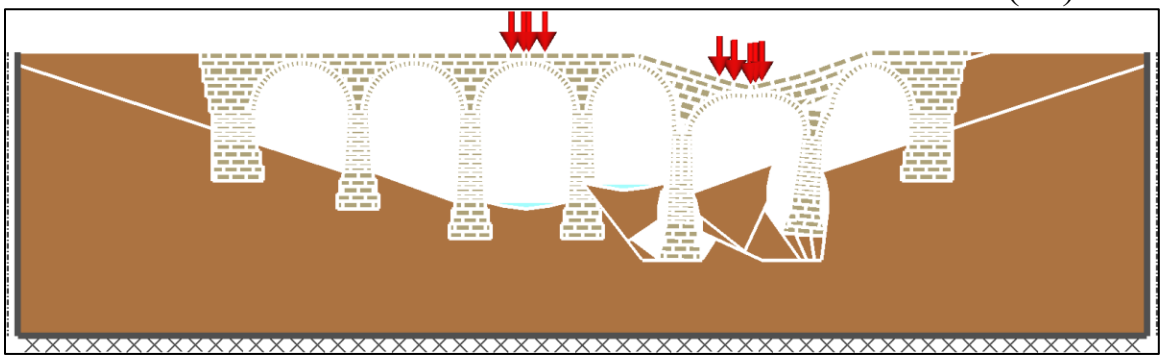
الحالة (17)



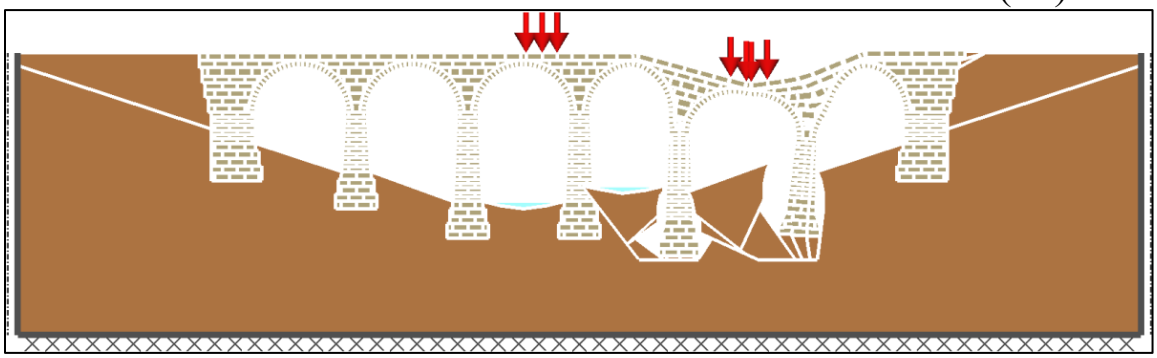
الحالة (18)



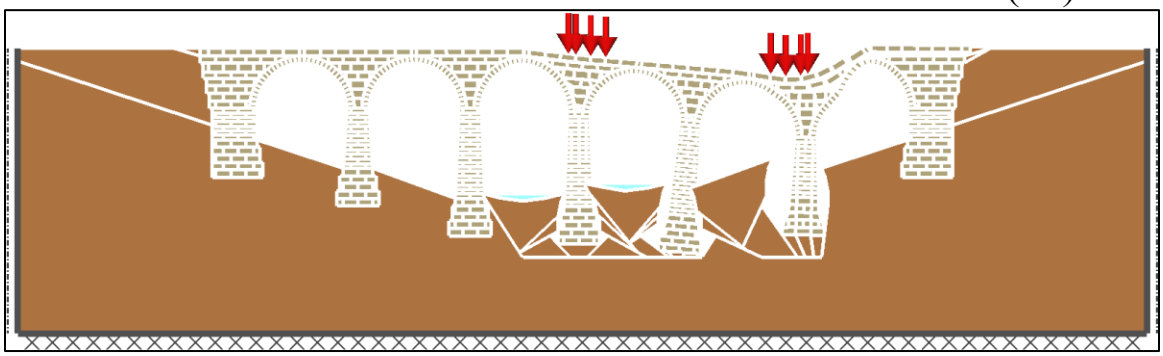
الحالة (19)



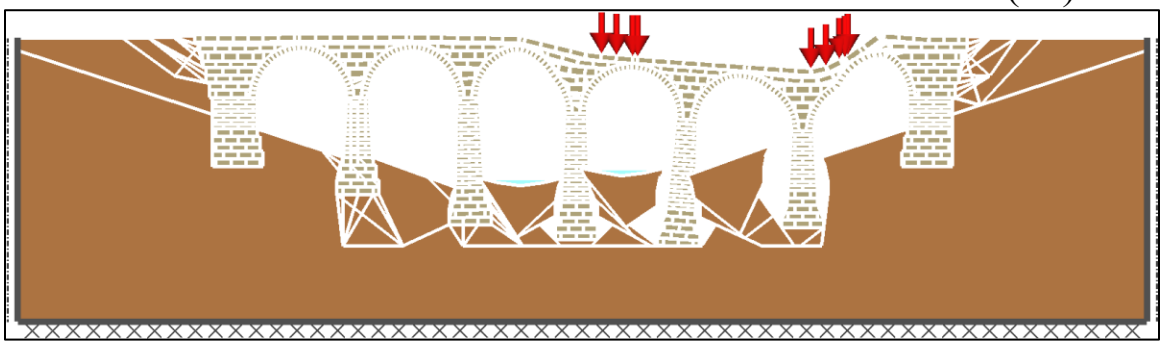
الحالة (20)



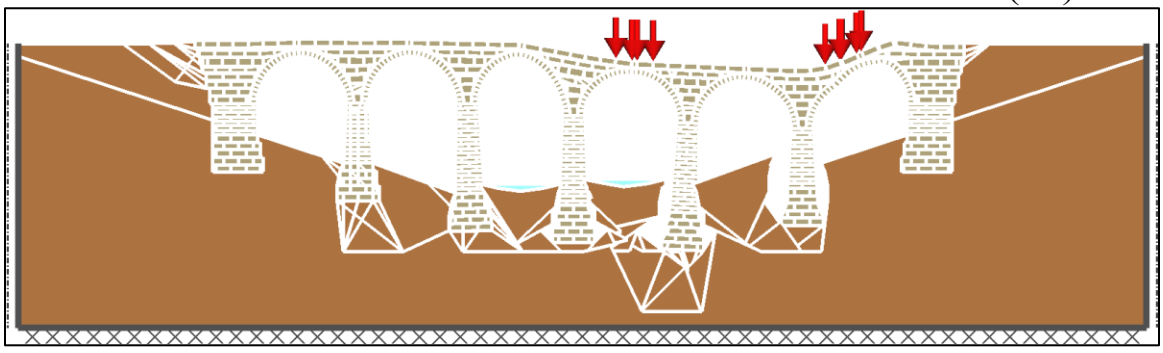
الحالة (21)



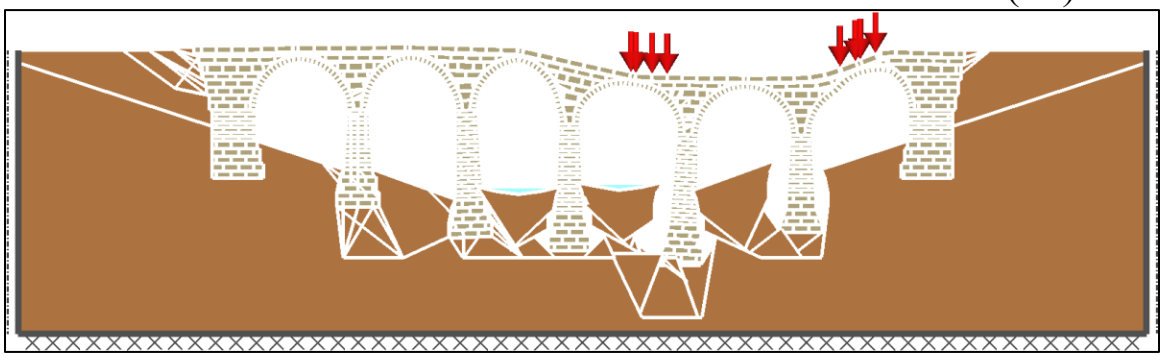
الحالة (22)



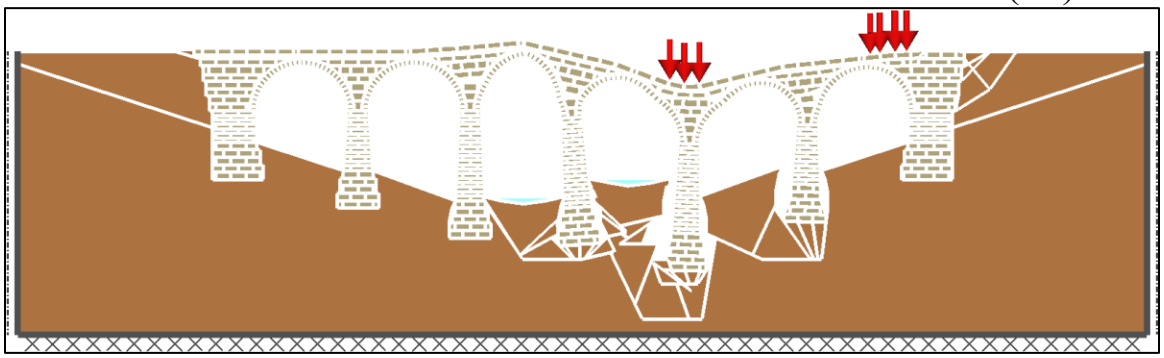
الحالة (23)



الحالة (24)



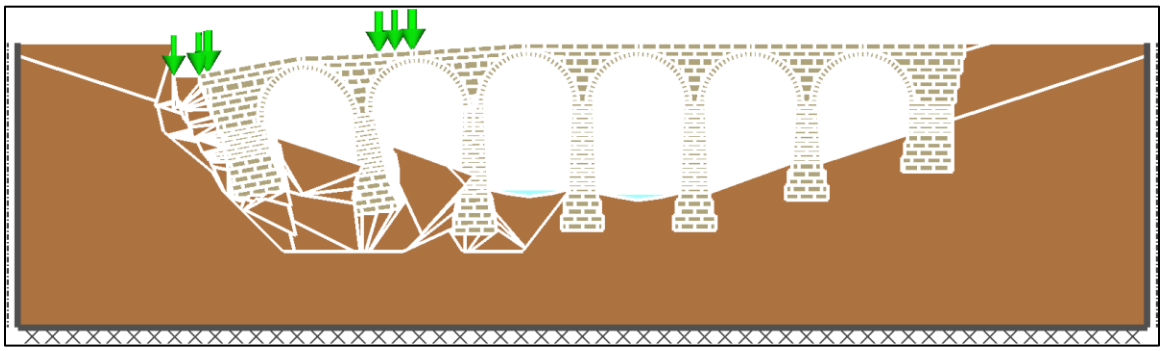
الحالة (25)



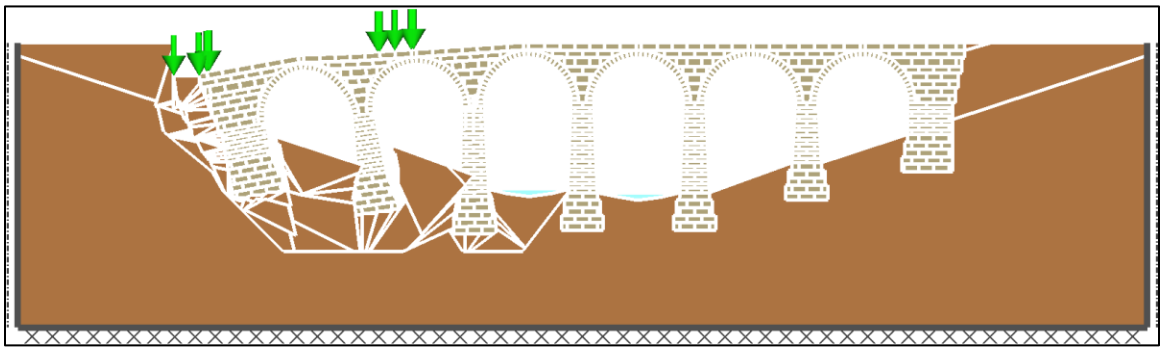
الملحق /3/

أشكال الانهيار المقابلة لقيم معامل الكفاية الزلزالي عند وجود الحمولة الشاقولية التصميمية من أجل تغيير زاوية الاحتكاك ومعامل التماسك للتربة والمرافقة للحالات الموجودة في الجدول (7-4).

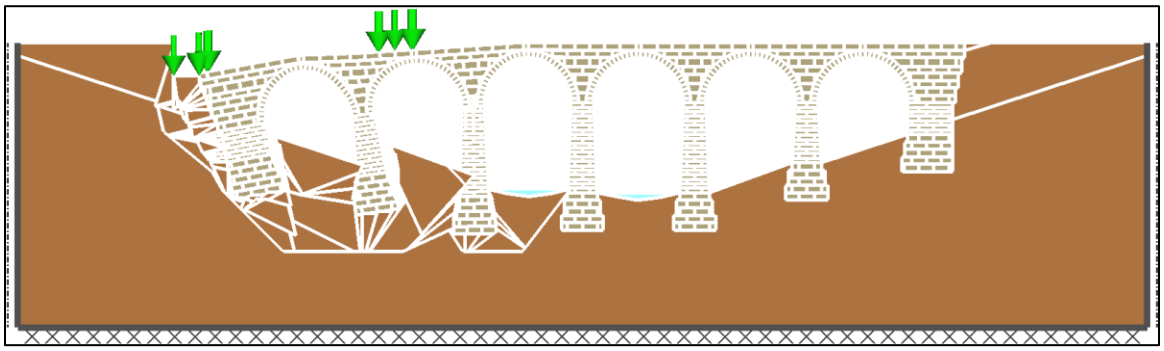
الحالة (1)



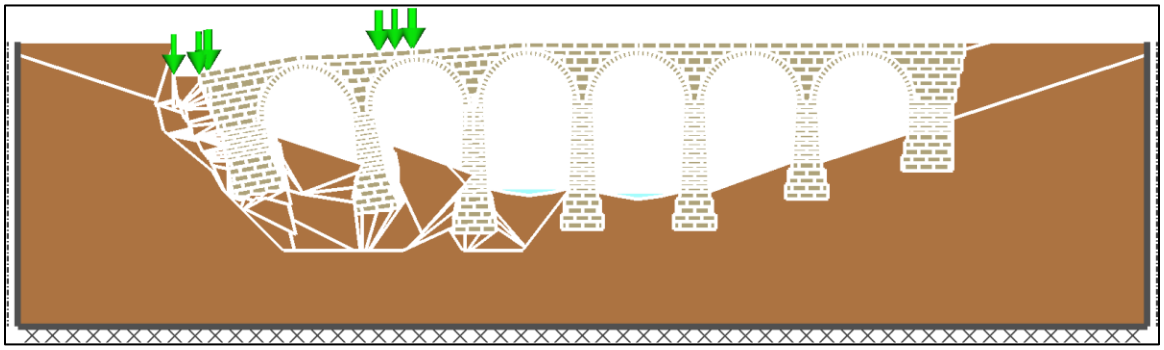
الحالة (2)



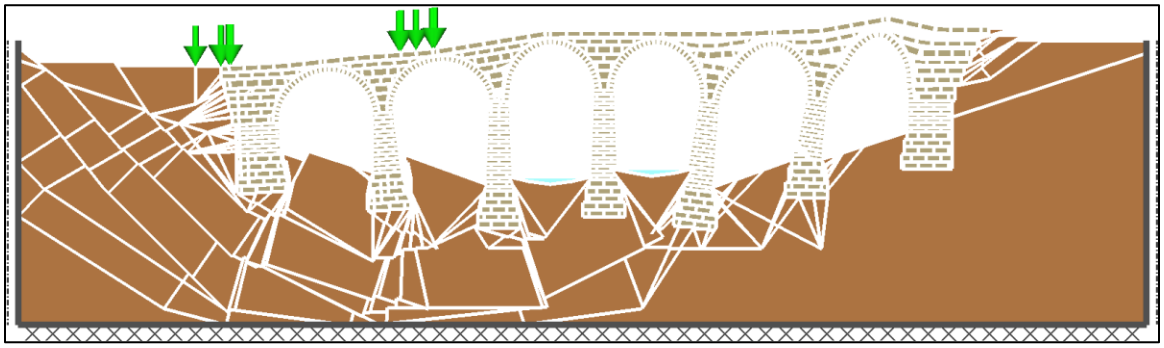
الحالة (3)



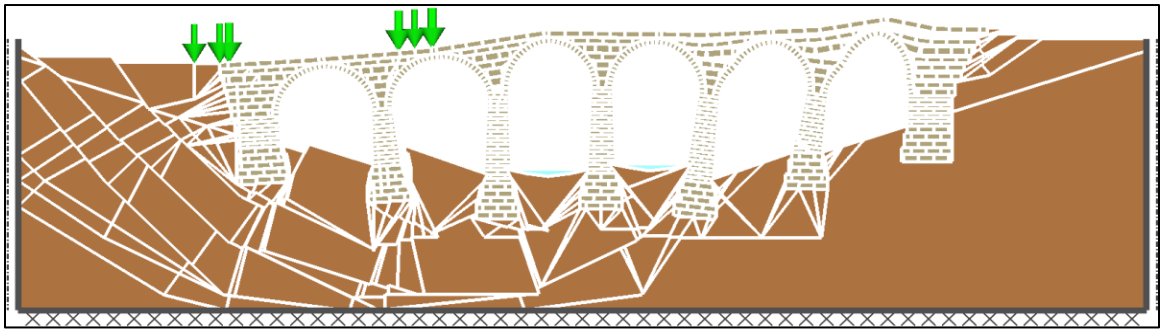
الحالة (4)



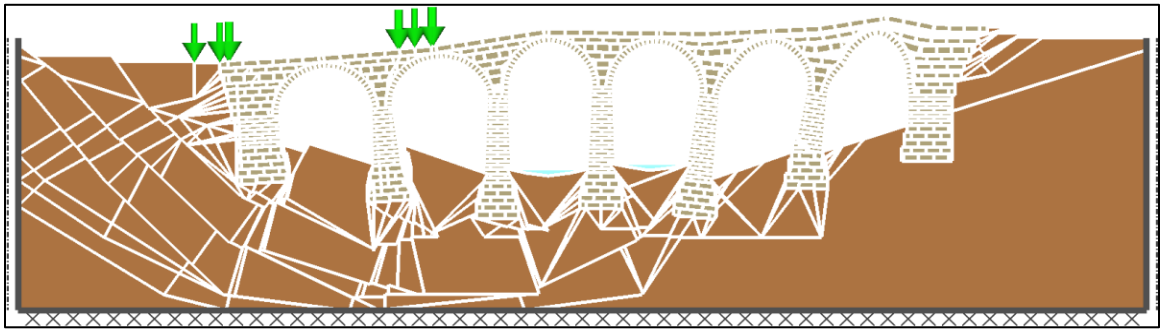
الحالة (5)



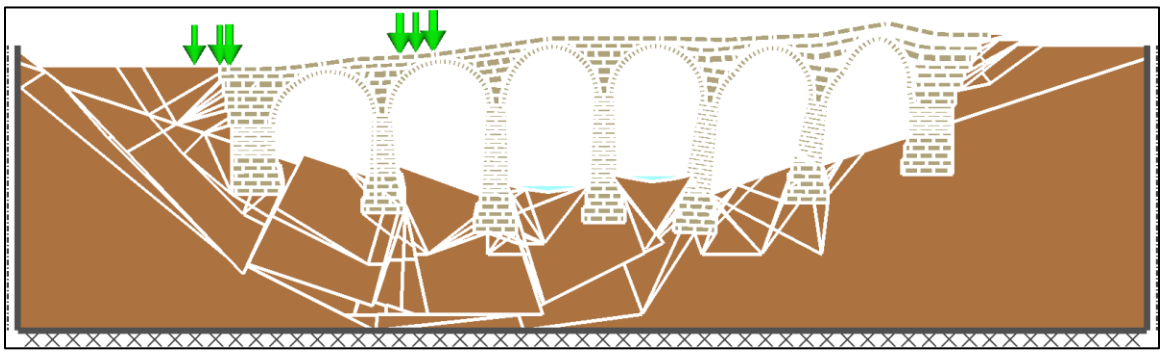
الحالة (6)



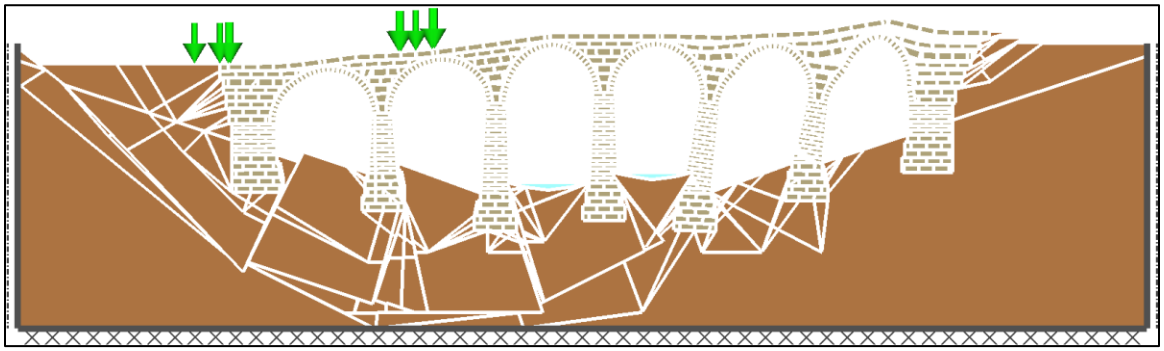
الحالة (7)



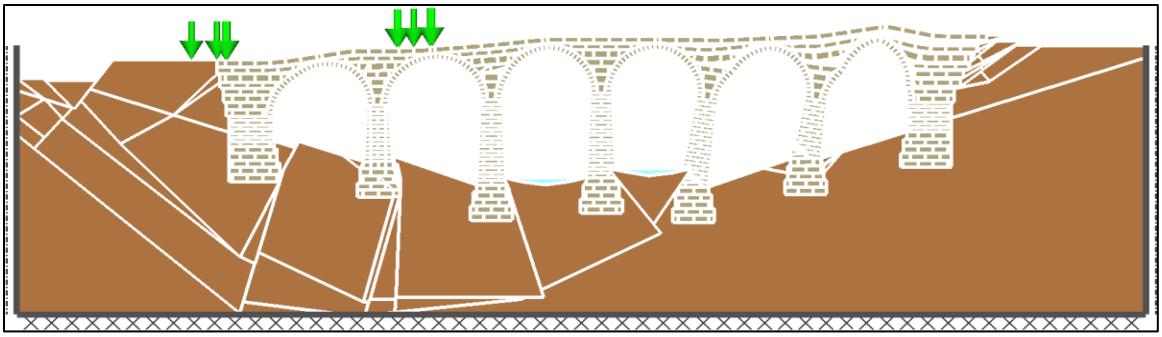
الحالة (8)



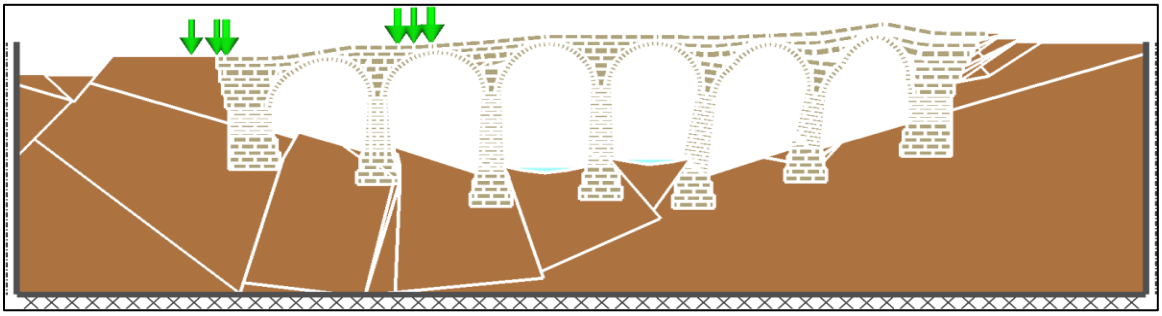
الحالة (9)



الحالة (10)



الحالة (11)



المراجع المستخدمة

[1] أرشيف المؤسسة العامة للخط الحديدي الحجازي. دمشق. سوريا.

[2] بوحلوفة، أحمد العربي. (2007). تقييم الحالة الراهنة للجسور الحجرية لإعادة تأهيلها. رسالة ماجستير، جامعة دمشق، دمشق.

[3] سطاس، محمد راتب و محمود كركندي. (2000). مواد البنـــاء، منشـــورات جامعـــة دمشق، دمشق.

[4] سعود، اندراوس و محمد راتب سطاس. (2001). مواد البناء واختباراتها، منشورات جامعة دمشق، دمشق.

[5] شديد، ادوار. إعادة تأهيل وصيانة المباني الحجرية لمقاومة الزلازل. جامعة دمشق– كلية الهندسة المدنية.

[6] ملحق الكود العربي السوري رقم (2) لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرســـانة المســـلحة. *تصميم وتحقيق المباني والمنشآت لمقاومة الزلازل*. (2005). دمشق.

[7] ميرو، اسامة، مواد البناء واختباراتها، منشورات جامعة دمشق، دمشق. (2003).

[8] Beuerman, Thomas E. (2009). *Inventory of Repairing and Strengthening Techniques for Masonry Arch Bridges*. Master's Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya-Spain.

[9] Bhatti, Abdul Qadir. (2009). *Seismic Vulnerability of Historical Arch Type Bridge Structures in Italy*. Master's Thesis, Padova University, Italy.

[10] Bouhaloufa, Ahmad. Kadiri, Taher. Zawawi, Samia. Ysian, Mohamed. BilHassan, Ali. Badawi, Sati. (2010). "SICZS-2010" Symposium International sur la Construction en Zone Sismique. Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie. (26-27 october 2010).

[11] BRITSH COLUMBIA. (2008). *Evaluation Report of the Second Narrows Bridge*. Ministry of Transportation.

[12] C. Melbourne and J. Wang, A. Tomor. A new masonry arch bridge assessment strategy (SMART). 5th International Conference on Arch Bridges.

[13] Carneiro Alves, Ana Sofia. (n.d.). (2009). Rehabilitation and Strength of Masonry Bridges. Ist.

[14] Choo, B. S. and Gong, N. G. (1995). Effect of skew on the strength of masonry arch bridges. Arch Bridges, Proceedings of the First International Conference on Arch Bridges, Bolton, UK, pp. 205–214, Thomas Telford, London.

[15] Das, P. C. (1993). *The assessment of masonry arch bridges, Arch Bridges*. Proceedings of the First International Conference on Arch Bridges, Bolton, UK, pp. 21–27, Thomas Telford, London.

[16] Garcia, Rafael Ozaeta. Martin, Jose Antonio. (2006). *CATALOGUE OF DAMAGES FOR MASONRY ARCH BRIDGES*. International Union of Railways.

[17] Ghiassi, Bahman., Soltani, Masoud., Tasnimi, Abbas Ali. (n.d.). Simplified Model for Analysis of Unreinforced Masonry Shear Walls under Combined Axial, Shear and Flexural Loading. Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Jalaale-al Ahmad Ave., Tehran, Iran.

[18] Heyman, J. (1982). The Masonry Arch. Ellis Horwood.

[19] Hodgson, J. A. and Fashole-Luke, P. S. (1997). Finite element analysis of the multi-ring brickwork arc. Proc. of the Seventh International Conference on Structural Faults and Repair, Edinburgh, pp. 135–142.

[20] Hughes, T. G. and Blackler, M. J. (1997). A review of the UK masonry arch assessment methods. Proc. Inst. Civ. Engrs. Structs. and Bldgs 122, 305–315.

[21] Hughes, T. G., Davies, M. C. R. and Taunton, P. R. (1998). Small scale modelling of brickwork arch bridges using a centrifuge. Proc. Inst. Civ. Engrs. Structs. and Bldgs. 128, 49–58.

[22] LimiteState:GEO Manual. Version 3.2.d. (6/January/2015). Sheffield, United Kingdom. LimiteState Ltd.

[23] LimiteState:RING Manual. Version 3.1.b. (22/September/2014). Sheffield, United Kingdom. LimiteState Ltd.

[24] Lourenco, Paulo. Rots, Jean G. Blaauwendraad, Johan. (1995). Tow approaches for the analysis of Masonry Structures: micro and macro-modeling. HERON, Vol.40, No.4.

[25] McKibbins, L; Melbourne, C; Sawar, N; Sicilia Gaillard. (2006) Masonry arch bridges: condition appraisal and remedial treatment. British Library Cataloguing in Publication.

[26] Minnesota Department of Transportation. (2007). Pavement Design.

[27] Raj, Sera Elsa., Srinivas, V., Eapen Sakaria, P. (2014, November). Failure Behaviour of Masonry Arch Bridges using Finite Element Analysis. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 4(11).

[28] Ryall, Mike., (2001). *Bridge Management*. Library of Congress Cataloguing in Publication Data

[29] SETRA. (1996). *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art*. Ministère des transports. Paris.

[30] Swiss Standard SN 670 010b. *Characteristic Coefficients of soils*. Association of Swiss Road and Traffic Engineers.

[31] WERNER, Thomas. MORRIS, David. (11-16 April 2010) . *3D Laser Scanning for Masonry Arch Bridges*. FIG Congress 2010. Facing the Challenges – Building the Capacity. Sydney, Australia,.

[32] Woolfenden, P. A. (1993). Modelling the masonry arch: improving modern bridge assessment using a nonlinear finite-element software package (MAFEA). Second International Conference on Bridge Management, University of Surrey, Guildford, UK, pp. 254–263, Thomas Telford, London.

Abstract

The masonry constructions are among the most famous and important construction due to its historical value that make them on the world heritage list.

As observed, masonry structures remain in service for longer time than expected because of their permanence of stone/mortar material property.

this research considers primarily the study of current situation of the masonry bridges Syria, where many of these bridges age back to the late first century. Despite the end of the old but they are still in service to this day.

This study includes a methodology to review the stone bridges and decide their current situation and their ability to withstand external loads specially seismic using the program (GEO3.2) based on the results to find the appropriate way of strengthening and rehabilitating the bridge to protect it from collapse in the future.

Syrian Arab Republic
Damascus University
Higher Institute of Earthquake Studies and Research
Structural Earthquake Engineering Department

Evaluating the Current Situation of the Masonry Bridges in Order to Rehabilitate Them To Resist Dynamic Loads (Moving and Seismic)

This Study was Prepared to Obtain Master Degree in
Structural Earthquake Engineering

Prepared By :

Eng. Sala-Sofia BACHOUR

Supervised By:

Dr .Eng. Sati BADAWI

Dr .Eng. Ibrahim ATEIA

2015